

Національний університет “Львівська політехніка”

Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису

**Андреїшин Андрій Сергійович**

УДК 622.24:004.384(043.5)

**СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ  
НАФТОВИДОБУВНОЇ УСТАНОВКИ  
НА ОСНОВІ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ**

05.09.03 – Електротехнічні комплекси та системи

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

А.С. Андреїшин

Науковий керівник: Маляр Андрій Васильович,  
доктор технічних наук, професор

**Львів – 2020**

## АНОТАЦІЯ

Андреїшин А. С. Система керування електроприводом нафтовидобувної установки на основі нейронної мережі. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.09.03 – “Електротехнічні комплекси та системи”. – Національний університет “Львівська політехніка”, Львів, 2020.

Дисертаційні дослідження спрямовані на вирішення ряду актуальних проблем нафтовидобувної промисловості України – підвищення ефективності роботи нафтовидобувних установок та впровадження інтелектуальних технологій для видобування нафти.

Актуальність проблеми зумовлена тим, що сучасний етап розвитку української нафтової промисловості характеризується збільшенням кількості родовищ, які значно вичерпали свій ресурс і знаходяться в пізній стадії розробки, коли відбір нафти зі свердловини зменшується, а тому зростають витрати на її видобування. В роботі розглядаються проблеми видобування нафти штанговими глибинними помпами, за допомогою яких в Україні експлуатується більшість свердловин. Керування їх роботою потребує впровадження постійно діючого моніторингу стану кожної свердловини та її нафтовидобувного обладнання.

В дисертації зроблено огляд літературних джерел, який показав, що на теперішній час в Україні відсутні автоматизовані системи керування процесом нафтовидобування на основі "інтелектуальних свердловин". Це зумовлює потребу в проведенні досліджень у напрямку розроблення нових способів керування електроприводами штангових глибинопомпових установок. Одним із основних завдань під час розроблення системи керування є вибір інформативних параметрів для ідентифікації стану глибинопомпового обладнання. Здійснивши аналіз існуючих способів ідентифікації в роботі показано, що найбільш придатним для розпізнавання стану свердловини та її обладнання є використання нейронних мереж. Використання нейромережі дає

змогу синтезувати автоматичну систему керування електроприводом верстатогойдалки, яка працює в режимі реального часу.

Для вибору типу нейронної мережі в дисертаційній роботі здійснено аналіз існуючих нейромереж. З метою визначення оптимальної структури нейромережі проведено ряд математичних експериментів з реально знятими залежностями зусилля в полірованому штоці та струму привідного двигуна діючих нафтовидобувних установок Бориславського НГВУ. На основі порівняння результатів розпізнавання експериментальних кривих зроблено висновок, що найбільш придатними для розпізнавання динамограм або струмограм є рекурентні нейронні мережі, зокрема мережа Хемінга. Однак, в процесі тривалої експлуатації свердловини така мережа може ускладнювати алгоритм адаптації системи керування та сповільнювати її роботу. Тому в роботі запропоновано модифікацію мережі Хемінга, зокрема замінено перший шар мережі алгоритмом побітового порівняння масивів даних. Така модифікація значно пришвидшила роботу нейронної мережі та збільшила точність розпізнавання вхідного сигналу. На основі запропонованої модифікації нейронної мережі Хемінга створено алгоритм її роботи. Показано, що приведення вхідного масиву даних до одного стандарту (двійкового представлення) підвищує універсальність системи розпізнавання, що дає можливість використовувати її в різних системах керування, де вхідними даними можуть бути динамограми, струмограми або ватметрограми.

Для оперативного та одночасного керування роботою багатьох свердловин нафтового родовища необхідно мати характеристики обладнання та навчальні вибірки для кожної свердловини. З цією метою в дисертаційній роботі пропонується база даних, в яку записуються дані всіх свердловин, і до якої має доступ контролер кожної свердловини. Такий підхід значно спрощує процес керування в реальному часі групою нафтовидобувних установок, оскільки дані розпізнавання стану однієї свердловини можуть бути використані для керування іншими (подібними) свердловинами.

В роботі показано, що суттєвий вплив на ефективність роботи системи керування нафтовидобувними установками має вибір програмно-апаратної бази. Від цього залежить швидкість оброблення даних, надійність та зручність експлуатації всього обладнання свердловини.

В дисертації запропоновано систему керування роботою штанговою нафтовидобувною установкою на базі модифікованої нейронної мережі Хемінга із зворотним зв'язком за коефіцієнтом заповнення. З врахуванням особливостей періодичної експлуатації малодобітних свердловин розроблено динамічну модель електромеханічної системи керування штанговою глибиновидобувною установкою. Вона складається з математичних моделей елементів електроприводу та системи керування, в основу яких покладені високоефективні методи та алгоритми аналізу різних режимів роботи нафтовидобувної установки. З використанням розробленої динамічної моделі системи електроприводу верстата-гойдалки запропоновано алгоритм визначення допустимих меж регулювання швидкості обертання привідного асинхронного двигуна, а також знаходження її оптимального значення, що забезпечує збалансований режим відбору рідини із свердловини.

В дисертації розроблена математична модель електромеханічної системи нафтовидобувної установки, яка є основою "інтелектуальної" системи керування свердловиною, і яку використано для відтворення реальних процесів та ідентифікації стану нафтовидобувного обладнання. Для проведення математичних експериментів в середовищі MATLAB SIMULINK створена модель електромеханічної системи керування штанговою глибиновидобувною установкою. В її основу покладено: математичні моделі частотно-керованого асинхронного електроприводу і верстата-гойдалки високого рівня адекватності; математична модель нейронної мережі; метод розрахунку періодичних залежностей координат режиму роботи нафтовидобувної установки на основі розв'язування крайової задачі. Такий підхід дає змогу отримати результат математичного моделювання з високою достовірністю і мінімальним обсягом

обчислень у позачасовій області, що є важливим для розроблення системи керування в реальному часі.

За допомогою створеної моделі проведено ряд математичних експериментів, які підтвердили ефективність роботи запропонованої модифікації нейронної мережі Хемінга щодо точності та швидкості розпізнавання вхідних масивів динамограм та струмограм. На прикладі продемонстровано, що створена система керування штанговою глибиновидобувною установкою може в режимі реального часу оперативно адаптуватись до зміни режимів експлуатації свердловини. В роботі наведено моделювання роботи електромеханічної системи як в робочих, так і в аварійних режимах роботи. З наведених результатів видно, що розроблена система автоматичного керування добре відпрацьовує вхідні дані та правильно формує сигнал завдання відповідно до стану свердловини та її обладнання.

Для проведення експериментальних досліджень створено лабораторний стенд електромеханічної системи керування штанговою глибиновидобувною установкою. Елементна база розробленого стенду складається з високоефективного мікропроцесорного обладнання, яке забезпечує необхідну швидкодію програми керування свердловиною в реальному часі. Для формування режиму, який відтворює роботу реальної нафтовидобувної установки, лабораторний стенд містить окремо створений вузол формування навантаження привідного асинхронного двигуна відповідно до реальної динамограми. Крім того, лабораторний стенд доповнений базою даних знятих динамограм, засобами вводу даних та візуалізації отриманих результатів.

В дисертації описано елементну базу та використане програмне забезпечення, наведено принципові схеми розробленого лабораторного стенду, алгоритм роботи та послідовність операцій, які виконувалися під час отримання експериментальних даних.

На основі отриманих на лабораторному стенді експериментальних результатів зроблено висновок про правильність запропонованих в

дисертаційній роботі теоретичних рішень та коректність застосування розроблених алгоритмів.

**Ключові слова:** штангова нафтовидобувна установка, асинхронний електропривод, малодобітна свердловина, неперервний режим роботи, динамограма, розпізнавання образів, нейронна мережа, математичне моделювання, система керування.

## ANNOTATION

Andreyishyn, A.S. Electric Drive Control System for Neural Network-Based Oil Extraction Unit. Qualification scientific work with the manuscript copyright.

Thesis for a Doctor's of Philosophy Degree in Engineering, specialty 05.09.03 – Electrotechnical Complexes and Systems. Lviv Polytechnic National University, Lviv, 2020.

The thesis research is aimed at the solution of a number of topical issues in Ukraine's oil industry such as raising the efficiency of oil production units and implementation of intellectual technologies for oil production.

The topicality of the problem is due to the fact that the current stage of development of the Ukrainian oil industry is characterized by an increase in the number of fields that have significantly exhausted their resources and are in a late stage of development, when the extraction of oil from the well decreases, and therefore the cost of its extraction increases. The thesis deals with the problems of oil production by sucker-rod pumps used for operating most wells in Ukraine. Their operation control requires the implementation of ongoing monitoring of the state of each well and its oil production equipment.

The thesis provides a review of literary sources, which showed that there are currently no automated control systems for oil production on the basis of intellectual wells in Ukraine. This creates the need for research in the area of developing new ways to control electric drives of sucker-rod pumping units. One of the main tasks in designing a control system is to select informative parameters to identify the status of the pumping equipment. The analysis of the existing methods of identification

conducted in the thesis shows that the most appropriate method of recognizing the state of the well and its equipment is the use of neural networks. Use of a neural network allows synthesizing an automatic control system for the electric drive of the pumping unit that operates in real time.

In order to choose the type of neural network, the analysis of the existing neural networks was performed in the thesis. To determine the optimal structure of the neural network, a series of mathematical experiments were conducted with the real dependencies of the force in the polished rod and the current of the drive motor of the operating Boryslav NGVU oil production facilities. Based on the comparison of the results of the recognition of experimental curves, it is concluded that recurrent neural networks, in particular the Hemming network, are most suitable for the recognition of load curves or time-current curves. However, during the long operation of the well, such a network can complicate the algorithm of adaptation of the control system and slow down its operation. Therefore, the thesis proposes a modification of the Hemming network, in particular, replacing the first layer of the network with the algorithm of bitwise comparison of data arrays. This modification has greatly improved the performance of the neural network and increased the recognition accuracy of the input signal. Based on the proposed modification of the Hemming neural network, an algorithm for its operation was created. It is shown that bringing an input data set to one standard (binary representation) enhances the versatility of the recognition system, enabling it to be used in different control systems where load curves, time-current curves or active power curves are inputs.

For the rapid and simultaneous control of many oil wells, it is necessary to have equipment characteristics and training samples for each well. To this end, the thesis proposes a database which records the data of all wells, and which is accessible for the controller of each well. This approach significantly simplifies the real-time control of a group of oil production units, since the state recognition data of one well can be used to control other (similar) wells.

It was shown that the choice of software and hardware base has a significant influence on the efficiency of the control system of oil production units. It determines the speed of data processing, reliability and ease of operation of all well equipment.

The thesis proposes a system for control of a sucker-rod pumping unit based on a modified Hemming neural network with a feedback on the coefficient of filling. Taking into account the specificities of the intermittent operation of stripper wells, a dynamic model of the electromechanical control system of a deep-well sucker-rod pumping unit was developed. It consists of the mathematical models of electric drive elements and control system, which are based on highly efficient methods and algorithms for analyzing the different modes of operation of an oil production unit. Using the developed dynamic model of the electric drive system of the sucker-rod pumping unit, there was proposed an algorithm for determining the admissible limits of control of the driving motor speed and for finding its optimal value that provides a balanced mode of fluid withdrawal from the well.

The mathematical model of the electromechanical system of the oil production unit developed in the thesis is the basis of an intelligent well control system used to reproduce real processes and to identify the state of the oil production equipment. For conducting mathematical experiments in the MATLAB SIMULINK environment, a model of an electromechanical control system for a sucker-rod pumping unit was created. It is based on high-adequacy mathematical models of frequency-controlled asynchronous electric drive and sucker-rod pump, mathematical model of the neural network; a method of calculating the periodic dependencies of the coordinates of the operation mode of an oil production unit based on solving the boundary value problem. This approach makes it possible to obtain the result of mathematical modeling with high reliability and minimal-volume calculations in the timeless domain, which is important for the development of control systems in real time.

Based on the created model, a number of mathematical experiments were carried out, which confirmed the effectiveness of the proposed modification of the Hamming neural network with respect to the accuracy and speed of recognition of the input arrays of load curves and time-current curves. The example demonstrates that the



developed system of sucker-rod pumping unit control can quickly in real time adapt to changing wells operation modes. The thesis presents the modelling of the electromechanical system both in working and emergency modes. The results show that the developed automatic control system works correctly processes the input data and generates the task signal according to the state of the well and its equipment.

To carry out the experimental studies, a laboratory workbench was created for the electromechanical control system of the sucker-rod pumping unit. The developed workbench consists of high-performance microprocessor equipment, which provides the necessary speed of the well control program in real-time. To form a mode that reproduces the operation of a real oil production facility, the laboratory workbench contains a separately designed load unit for the driving induction motor according to a real load curve. In addition, the laboratory workbench is complemented by a database of recorded load curves, data entry tools and visualization of the results obtained.

The thesis describes the element base and the software used, outlines the schematics of the developed laboratory workbench, the algorithm of operation and the sequence of operations performed during the acquisition of experimental data.

On the basis of the experimental results obtained at the laboratory workbench, it is concluded that the theoretical solutions proposed in the thesis and the application of the developed algorithms are correct.

***Key words:*** sucker-rod pumping unit, asynchronous electric drive, marginal well, uninterrupted operation mode, dynamogram, pattern recognition, neural network, mathematical modeling, control system.

### Список публікацій здобувача:

1. Маляр А.В., Андрєшин А.С., Місюренко В.О. Застосування фазі-регулятора в системі керування електроприводом штангової нафтовидобувної установки. Вісник НТУ ХПІ “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. 2010. С. 569–570.
2. Маляр А.В., Андрєшин А.С. Використання нейромережі для побудови системи керування електроприводом верстата-гойдалки. Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. 2011. № 707. С 72–82.
3. Маляр А.В., Андрєшин А.С., Тацій А.Р. Розпізнавання динамограми верстата-гойдалки за допомогою нейронної мережі. Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління “Автоматика-2011”. м. Львів, 28-30 вересня, 2011. С. 156–157.
4. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєшин А.С. Система автоматичного керування роботою штангової глибиннопомпової установки з врахуванням дебіту пласта. Наукові праці ДонНТУ. Серія Електротехніка і енергетика. 2011. Вип. 11(186). С. 267–270.
5. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєшин А.С. Визначення навантажень двигунів штангових глибиннопомпових нафтовидобувних установок. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2011. Вип. 03(79). С 200–201.
6. Маляр А.В., Андрєшин А.С. Вибір нейронної мережі для визначення коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Темат. випуск “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. Кременчук: КрНУ. 2012. Вип. 3/2012 (19). С. 543–545.
7. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєшин А.С. Використання нейромережі для визначення коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Вісник НУ “Львівська політехніка”. “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. 2012. № 736. С. 94–99.
8. Андрєшин А.С. Система розпізнавання динамограм нафтової установки на нейронній мережі: XII Міжнародна науково-технічна конференція

“Проблеми сучасної електротехніки”. м. Вінниця, 4–8 червня, 2012. 1 електрон. опт. диск (CD-R).

9. Андрєйшин А.С., Маляр А.В., Калужний Б.С., Лещук С.М. Вибір нейронної мережі для розпізнавання стану нафтової свердловини. Вісник НТУ ХПІ “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. 2013. № 36. С.495–496.

10. Андрєйшин А.С. Розпізнавання стану свердловини та нафтовидобувного обладнання на основі нейронної мережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2013. Вип. 2/2013(22). Ч.2. С.184–188.

11. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Розрахунок параметрів функціонування штангової нафтовидобувної глибиннопомпової установки. Міжвідомчий збірник наукових праць “Відбір і обробка інформації”. 2013. Випуск 38 (114). С. 75–81.

12. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Динамічні та статичні режими роботи електроприводів штангових нафтовидобувних установок. Вісник НУ “Львівська політехніка” "Електроенергетичні та електромеханічні системи". 2013. № 763. С.54–59.

13. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Дослідження аварійних режимів штангової глибиннопомпової установки. Електромеханічні і енергозберігаючі системи, 2014. Вип. 4/2014(28). С.40–47.

14. Андрєйшин А.С., Маляр А.В., Калужний Б.С., Головач І.Р. Апаратно-програмна реалізація системи керування штанговою глибинно-помповою установкою. Електротехнічні та комп’ютерні системи. 2014. Вип. № 15 (91). С. 165–168.

15. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Розрахунок збалансованого режиму роботи електроприводу штангової нафтовидобувної установки малодебітної свердловини. Науковий вісник Нац. гірничого ун-ту “Електротехнічні комплекси та системи”. Вип. № 4. 2014. С. 39–44.

16. A. Malyar, B. Kaluzhnyi, A. Andreishyn, K. Molnar. Effect of sucker-rod pumping unit walking beam oscillation frequency on asynchronous electric drive. *Computation Problem of Electrical Engineering*. Vol.6, No.1. 2016. P.p. 25–30.

17. A. Malyar, A. Andreishyn, B. Kaluzhnyi, I. Holovach. Study of the Hamming Network Efficiency for the Sucker-Rod Oil Pumping Unit Status Identification. *Computation Problem of Electrical Engineering*. No.1. 2017. P.p. 43–49.

18. Маляр В.С., Маляр А.В., Андреїшин А.С. Метод розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. *Електротехніка і електромеханіка*. 2019. № 2. С. 9–13.

19. Маляр А.В., Андреїшин А.С. Розроблення математичної моделі задля розрахунку допустимих параметрів робочих режимів частотно-керованого електроприводу штангової нафтовидобувної установки. *Технічна електродинаміка*. 2020. №2. С. 43-49.

## З М І С Т

|   | стор. |
|---|-------|
| ВСТУП .....   | 17    |
| РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ<br>НАФТИ З МАЛОДЕБІТНИХ СВЕРДЛОВИН..... | 26    |
| 1.1. Способи та основні проблеми експлуатації малодебітних<br>свердловин.....                 | 26    |
| 1.2. Загальні принципи побудови систем керування та контролю<br>роботи ШНВУ.....              | 28    |
| 1.3. Методи розпізнавання динамограм, ватметрограм та<br>струмограм.....                      | 34    |
| 1.4. Огляд апаратних засобів для реалізації систем керування роботою<br>ШНВУ.....             | 41    |
| 1.5. Аналіз мікропроцесорних засобів для реалізації алгоритму<br>керування роботою ШНВУ ..... | 43    |
| 1.6. Вибір напрямку досліджень .....  | 47    |
| Висновки.....   | 51    |
| РОЗДІЛ 2. ПОБУДОВА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ<br>ШНВУ .....                              | 53    |
| 2.1. Структура системи керування нафтовидобувною установкою.....                              | 53    |
| 2.2. Обробка вхідних і вихідних даних.....  | 56    |
| 2.3. Проектування нейронної мережі прямого поширення.....                                     | 59    |
| 2.4. Проектування рекурентної нейронної мережі.....   | 69    |
| 2.5. Використання бази даних в складі системи розпізнавання образів...<br>Висновки.....       | 81    |
|   | 84    |
| РОЗДІЛ 3. МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ<br>ШНВУ .....                                 | 86    |
| 3.1. Особливості системи електроприводу ШНВУ .....  | 86    |
| 3.2. Основні вимоги до системи автоматичного керування роботою<br>електроприводу ШНВУ .....   | 87    |

|  |            |
|--|------------|
|  | 14         |
| 3.3. Математичні моделі елементів системи електроприводу ШНВУ.....   | 88         |
| 3.3.1 Математична модель верстата-гойдалки.....  | 88         |
| 3.3.2. Математична модель двигуна електроприводу ШНВУ .....  | 91         |
| 3.4. Математичне моделювання стаціонарного режиму електроприводу ШНВУ .....  | 95         |
| 3.5. Динамічні та статичні режими роботи електроприводу ШНВУ .....   | 98         |
| 3.5.1. Усталений динамічний режим.....   | 99         |
| 3.5.2. Усталений статичний режим.....  | 101        |
| 3.6. Ідентифікація параметрів функціонування ШНВУ .....  | 103        |
| 3.7. Збалансований режим роботи електроприводу ШНВУ малодобітної свердловини.....                                      | 104        |
| 3.8. Вплив частоти гойдань балансира ШНВУ на роботу електроприводу .....   | 108        |
| 3.9. Розрахунок механічних характеристик приводних асинхронних двигунів ШНВУ при різних частотах напруги живлення..... | 113        |
| 3.10. Моделювання роботи ШНВУ малодобітної свердловини в середовищі MATLAB SIMULINK.....                               | 118        |
| 3.11. Моделювання робочих режимів ШНВУ .....   | 126        |
| 3.12. Моделювання аварійних режимів ШНВУ .....   | 128        |
| Висновки.....  | 134        |
| <br>   |            |
| <b>РОЗДІЛ 4. АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ</b>   |            |
| <b>СПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШНВУ .....</b>  | <b>136</b> |
| 4.1. Підготовка апаратного комплексу для роботи в схемі автоматичного керування ШНВУ .....                             | 136        |
| 4.2. Програмна реалізація схеми керування ШНВУ .....   | 142        |
| 4.3. Моделювання навантаження.....   | 150        |
| 4.4. Запуск розробленої схеми та результати досліджень.....  | 154        |
| 4.4.1 Перший запуск та ініціалізація .....   | 154        |
| 4.4.2 Штатний режим роботи (керування швидкістю двигуна).....  | 156        |
| 4.4.3 Аварійні режими роботи .....   | 159        |

|  |     |
|--|-----|
|  | 15  |
| Висновки.....  | 164 |
| ВИСНОВКИ .....   | 165 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....   | 168 |
| Додаток 1. Акт про експериментальні дослідження макетного взірця автоматичної системи керування нафтовидобувною установкою на основі нейронної мережі..... | 186 |
| Додаток 2. Акт про впровадження результатів дисертаційної роботи в навчальний процес .....   | 187 |

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

АД – асинхронний двигун

БД – база даних

ВЧ – висока частота

ДЗ – давач зусилля

ЕМС – електромеханічна система

СК – система керування

ДП – давач положення

ДР – диференціальне рівняння

ЕРС – електрорушійна сила

КП – контрольований пункт

МРП – міжремонтний період

ПК – персональний комп'ютер

САК – система автоматичного керування

САПР – система автоматизованого проектування

СУБД – система управління базою даних

ЦП – центральний процесор

ЦПК – центральний пункт керування

ШІМ – широтно-імпульсна модуляція

ШНВУ – штангова нафтовидобувна установка



## ВСТУП

Україна належить до країн, які не можуть повністю себе забезпечити власними нафтою та газом, а тому імпортує значний обсяг цих енергоносіїв [105]. Згідно з “Енергетичною стратегією України на період до 2030 р.” [43], затвердженою Постановою Кабінету Міністрів від 18 серпня 2017 р. (№ 609) для підвищення енергетичної незалежності нашої держави необхідно не тільки диверсифікувати постачання вуглеводнів, але й збільшити власний видобуток нафти шляхом збільшення обсягів геологорозвідувальних і бурових робіт, використання нових технологій, розроблення та впровадження енергоефективного нафтовидобувного обладнання.

Сучасний етап розвитку української нафтової промисловості характеризується збільшенням кількості родовищ, які значно вичерпали свій ресурс і знаходяться в пізній стадії розробки, коли відбір нафти зі свердловини зменшується, а затрати при цьому зростають [93, 143]. Понад 80% всього видобутку нафти в Україні забезпечують родовища рівень виснаженості яких становить біля 60%. Нових родовищ в Україні відкривається досить мала кількість, а тому важливою задачею є підвищення ефективності існуючих нафтових родовищ [40, 55]. На цей процес негативно впливають такі фактори, як фізичне зношення та технологічна відсталість технічних засобів, відсутність належного фінансування та стимулювання проведення реконструкції й оновлення виробництва. Модернізація старих нафтопромислів повинна відбуватися на основі сучасних світових досягнень в галузі нафтовидобування, систем керування, комп’ютерної та мікропроцесорної техніки [17–19, 30, 31, 36, 158, 167, 169]. Це дасть можливість підвищити коефіцієнт нафтовіддачі промислу, який сьогодні не перевищує 30% [40], і ще протягом довгого часу експлуатувати старі родовища.

Переважна частина нафтових родовищ в Україні [1, 13–16, 23, 25], як і у світовій практиці [63], видобувається за допомогою штангових нафтовидобувних установок (ШНВУ), які розосереджені на великій площі

родовища, а керування їх роботою потребує впровадження постійно діючого моніторингу стану кожної свердловини та її нафтовидобувного обладнання.

Видобування нафти за допомогою ШНВУ потребує значної кількості електроенергії [49, 145], а тому існує проблема зменшення енерговитрат на одиницю видобутої продукції [132, 170, 171], які залежать від правильного вибору обладнання, встановлення оптимальних режимів відбору рідини і ступеня автоматизації експлуатації свердловини.

Інтенсифікація технологічних процесів видобування нафти потребує подальшого вдосконалення систем автоматизації нафтової галузі, що, в свою чергу, пов'язано з отриманням й обробкою великого обсягу вимірювальної інформації. Цим пояснюється значна увага до розвитку вимірювальних інформаційних систем [140], призначених для збору, перетворення, передачі, зберігання, комп'ютерної обробки та подання в необхідному вигляді різного роду технологічної інформації. Отже, для підвищення ефективності процесу видобування нафти потрібна модернізація систем електроприводів ШНВУ на основі оптимізації режимів їх роботи та впровадження інноваційних технологій [12, 13].

Вибір режиму роботи електроприводу свердловини повинен здійснюватися на основі аналізу продуктивності свердловини. Ефективність роботи його значною мірою визначається неперервною оптимізацією експлуатаційних режимів видобувної системи “пласт–свердловина–глибинопомпова установка”. Особливо важливою ця задача є для малодебітних свердловин, які працюють в режимі періодичної експлуатації [2, 3, 6, 22, 31, 131, 152].

Для таких свердловин необхідно забезпечити зміну режиму роботи верстата-гойдалки так, щоб він відповідав темпові наповнення глибинної помпи нафтою. Тобто, ставиться завдання контролювати рівень рідини не тільки у працюючій свердловині, але й визначити мінімальний поріг заповнення глибинної помпи, при якому доцільно здійснювати відбір нафти. Очевидно, що найбільш ефективно цю проблему можна вирішити шляхом застосування

систем керування на основі регульованого електроприводу [135] та алгоритмів розпізнавання і діагностики [4, 17, 22, 28, 32, 39, 41, 59, 115, 119, 123, 140].

Основною тенденцією на теперішній час є впровадження, так званих, “технологій інтелектуальних свердловин” – “intelligent well technology” (IWT) [41, 42, 44, 72, 74, 98, 104, 110, 129, 133, 150, 167]. “Інтелектуальною” свердловиною зазвичай називають комплекс наземного і підземного обладнання, що включає в себе, як правило, блок керування з мікроконтролером та перетворювачем частоти і систему телеметрії, що дає змогу отримувати інформацію про параметри роботи нафтовидобувної установки. Контролер блоку керування при цьому повинен на основі одержуваної інформації за спеціальним алгоритмом керувати роботою установки з метою забезпечення заданого режиму, наприклад, стабілізації коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Впровадження “технологій інтелектуальних свердловин” потребує проведення значного обсягу наукових досліджень, пов'язаних з експлуатацією свердловини і електротехнічного обладнання. Основною метою створення таких свердловин є автоматичне керування процесом видобування нафти у реальному часі.

Під час синтезу сучасних електромеханічних систем ШНВУ важливим є створення адаптивних алгоритмів керування, які базуються на адекватних математичних моделях як об'єкту керування, так і процесів, що відбуваються в усій системі. Для цього необхідно мати високої адекватності математичні моделі, які придатні для аналізу роботи ШНВУ в різних експлуатаційних режимах. Такі моделі в поєднанні з сучасними обчислювальними методами повинні лягти в основу програмного забезпечення для аналізу та діагностики електромеханічних систем ШНВУ. Окрім того, для успішної реалізації оптимального керування важливим є вибір апаратно-програмного забезпечення, до якого ставляться щораз жорсткіші вимоги, спрямовані на досягнення найбільш ефективного використання наявних ресурсів.

Вирішити ці проблеми можливо шляхом аналізу роботи наземного та підземного обладнання свердловини на основі математичного моделювання та

створення нових мікропроцесорних систем автоматизації роботи ШНВУ, які забезпечать ефективний режим роботи свердловини. Це зумовлює потребу у проведенні досліджень в напрямку сучасних методів керування електроприводами, діагностики та ідентифікації стану нафтових свердловин.

**Актуальність теми.** Особливості видобування нафти штанговими глибинопомповими установками, а саме – відносна складність та висока вартість обладнання й значні витрати електроенергії на одиницю видобутої нафти, особливо з малодобітних свердловин, значні механічні навантаження, які виникають в установці, трудомісткість ремонтів підземної частини обладнання зумовлюють підвищені вимоги до оперативного контролю його стану та функцій керування електроприводом ШНВУ. Це потребує подальшого розвитку та вдосконалення методів дослідження електроприводів ШНВУ. Відомі системи автоматичного керування швидко старіють, відстають від потреб практики і не задовольняють сучасним вимогам щодо ефективної експлуатації свердловин та надійності захисту обладнання і діагностики технічного стану. На теперішній час основний акцент робиться на використанні частотно-керованого електроприводу для регулювання продуктивності глибинної помпи. Не завжди такі системи керування є оптимальними для конкретних умов видобутку нафти через можливу складність та наявність надлишкових функцій, що знижує надійність системи в цілому. Тому розроблення сучасних методів діагностики, та систем керування штанговими нафтовидобувними установками, які б забезпечували безперервний автоматичний контроль та раціональну експлуатацію свердловин на базі мікропроцесорних засобів та сучасних досягнень в теорії автоматизованого керування і електроприводу, є актуальною задачею.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертаційна робота виконана в рамках науково-дослідних робіт Національного університету “Львівська політехніка”, тематика яких відповідає координаційним цільовим та галузевим програмам:

– пріоритетному напрямку розвитку науки і техніки Міносвіти і науки України “Енергетика та енергоефективність” (2010 р.);

– тематичного напрямку наукових досліджень і науково-технічних розробок Львівської політехніки “Оптимальне керування електротехнічними і електромеханічними системами та технологічними процесами за критеріями енергоощадності, електротехнологічної ефективності і електромагнітної сумісності”.

Тема дисертаційної роботи відповідає тематиці наукових робіт кафедри електроприводу і комп’ютеризованих електромеханічних систем Інституту енергетики і систем керування Національного університету “Львівська політехніка”, де протягом багатьох років ведуться роботи за науковим напрямком “Автоматизація механізованого видобування нафти”.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є вдосконалення існуючих і розроблення нових ефективних способів діагностики стану ШНВУ та синтез на їх основі алгоритмів керування, в яких враховуються всі важливі чинники, що впливають на роботу обладнання свердловини, і на основі яких будуть створені системи комп’ютерної діагностики та керування роботою електроприводів штангових нафтовидобувних установок.

Для досягнення поставленої мети розв’язано наступні завдання:

- проаналізовано існуючі системи керування електроприводами штангових нафтовидобувних установок та технічні засоби їх реалізації;
- розроблено схему системи керування штанговою глибинною помпою на основі нейронної мережі;
- розроблено алгоритм перетворення вхідних даних від давачів первинної інформації в зображення;
- розроблено алгоритм роботи системи розпізнавання образів на основі нейромережі;
- створено базу даних для зберігання еталонних зображень динамограм;
- створено математичну модель електромеханічної системи глибиннопомпової установки з нейромережевою системою керування;

- проведено методом комп'ютерного симулювання широкий спектр досліджень по перевірці та аналізу запропонованих теоретичних положень;
- розроблено програмно-апаратний комплекс для здійснення керування роботою нафтовидобувної установки;
- виконано експериментальні дослідження з метою перевірки працездатності розроблених способів та алгоритмів керування роботою ШНВУ.

*Об'єктом дослідження* є процеси в електромеханічних системах штангових нафтовидобувних установок.

*Предметом дослідження* є методи діагностики стану свердловини й оптимізації режимів роботи нафтовидобувних установок та синтезу систем керування електроприводами ШНВУ на основі сучасних досягнень в сфері теорії керування, штучних нейронних мереж, електромеханіки та комп'ютерної техніки.

*Методи дослідження.* У роботі для аналізу механічної частини ШНВУ, зокрема верстата-гойдалки, використано методи теоретичної механіки та аналітичної геометрії. В основу розроблених математичних моделей електромеханічної системи ШНВУ покладено методи теорії автоматичного керування, теоретичної електротехніки, електричних машин, теорії штучних нейронних мереж, теорії ймовірності та математичної статистики, теорії розпізнавання образів. Розроблені програми визначення та розрахунку коефіцієнта заповнення глибинної помпи в динамічних режимах базуються на сучасних досягненнях у сфері алгоритмізації та комп'ютерного моделювання.

#### ***Наукова новизна одержаних результатів.***

- Вперше запропоновано метод оперативної діагностики стану глибинопомпової установки на основі рекурентної нейронної мережі, що дало змогу контролювати її поточний стан, і тим самим забезпечити ефективну експлуатацію ШНВУ.
- Отримала подальший розвиток теорія штучних нейронних мереж в контексті створення вхідного фільтра для різних типів нейронних мереж, що дало змогу уніфікувати задачу розпізнавання стану наземного та підземного

обладнання свердловини та спроектувати систему автоматичного керування ШНВУ, яка забезпечує раціональний режим нафтовидобування при неповному або зашумленому наборі вхідних даних.

- Удосконалено спосіб оброблення масиву даних, отриманих від давачів, шляхом використання двійкового кодування, у результаті чого створено єдиний підхід щодо діагностування стану свердловини незалежно від масштабу знятої первинної інформації.

- Отримала подальший розвиток теорія предиктивного керування щодо розроблення алгоритмів прогнозування в реальному часі динаміки процесу видобування нафти із малодобітної свердловини, що дало змогу формувати керуючі впливи на систему електроприводу для забезпечення неперервної роботи ШНВУ.

#### ***Практичне значення одержаних результатів.***

Результати теоретичних досліджень, які покладені в основу розроблених алгоритмів й комп'ютерних програм, послужили основою для створення нових та модернізації існуючих систем автоматичного керування ШНВУ. Розроблене програмне забезпечення та запропоновані схемотехнічні рішення можуть бути безпосередньо використані для здійснення ефективного оперативного керування роботою ШНВУ в конкретних умовах експлуатації нафтових родовищ. Розроблена система керування на основі нейронної мережі дає змогу оперативно визначати поточний стан свердловини та її обладнання, що підвищує ефективність процесу нафтовидобування та запобігає виникненню аварійних ситуацій.

Матеріали роботи використані при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт МОН України, у яких автор був співвиконавцем:

- "Оптимальне багатокритеріальне керування динамічними процесами технологічних об'єктів на основі теорії нечітких множин", 2011–2013р.р., (ДР № 0111u001230);
- "Підвищення енергоефективності систем житлово-комунального господарства", 2012–2013р.р., (ДР № 0113u003180).

Результати досліджень пройшли апробацію в НГВУ “Долинанافتогаз” (Додаток 1) та використовуються в навчальному процесі Національного університету “Львівська політехніка” під час курсового проектування та виконання магістерських кваліфікаційних робіт (Додаток 2).

**Особистий внесок здобувача.** До дисертаційної роботи увійшли теоретичні положення, методи й алгоритми, отримані автором особисто. В опублікованих у співавторстві наукових працях автору дисертації належить:

в [1] – синтез нечіткого регулятора та його інтеграція в систему керування електроприводом ШНВУ; в [4, 5, 16, 18, 19] – розробка математичної моделі штангової глибинопомпової установки та електроприводу верстата-гойдалки; в [2, 3, 7, 10] – створення алгоритму розпізнавання образів динамограм та струмограм за допомогою нейронної мережі; в [6, 9] – перевірка ефективних методів розпізнавання образів за допомогою нейронних мереж та їх тестування; в [8, 11, 12, 13, 15] – результати досліджень методами математичного моделювання та фізичного експерименту процесів і характеристик системи керування електроприводом ШНВУ; в [14, 17] – розроблення експериментальної установки для проведення досліджень роботи системи керування електроприводом штангових глибиннопомпових установок.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались, обговорювались та отримали позитивний відгук на:

- II Міжнародній конференції молодих вчених “Енергетика та системи керування 2010” (EPECS-2010);
- Міжнародних науково-технічних конференціях “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”, Харків, 2010 р., 2012 р., 2013 р.
- XVIII Міжнародній конференції з автоматичного управління "Автоматика - 2011", Львів, 2011 р.;
- XII Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми сучасної електротехніки", ПСЕ-2012, Вінниця.



- Міжнародній конференції "Проблеми енергоресурсозбереження в електротехнічних системах. Наука, освіта і практика" (ICPEES-2013)
- семінарі НАН України з комплексної проблеми "Наукові основи електроенергетики": "Моделі та методи комп'ютерного аналізу електричних кіл та електромеханічних систем", на науково-технічних конференціях Національного університету "Львівська політехніка" і наукових семінарах кафедри "Електромехатроніка і комп'ютеризовані електромеханічні системи", м. Львів.

*Публікації.* Основні положення дисертації відображені в 19 публікаціях, у тому числі: 17 статей у наукових фахових виданнях України, з них 7 таких, що входять до наукометричних баз даних (Scopus, Web of Science Core Collection, Index Copernicus); 2 – у матеріалах конференцій та семінарів.

## РОЗДІЛ 1

### АНАЛІЗ МЕТОДІВ ТА ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИДОБУВАННЯ НАФТИ З МАЛОДЕБІТНИХ СВЕРДЛОВИН

#### 1.1. Способи та основні проблеми експлуатації малодебітних свердловин

Сучасний стан нафтовидобувної галузі в Україні, як і в багатьох інших країнах світу, характеризується тим, що значна частина розроблених свердловин знаходиться в пізній стадії розробки, оскільки суттєво вичерпала свій ресурс і є мало- або середньо-дебітними [2, 6, 19, 39, 55, 96]. Зниження дебіту свердловин призводить до зростання питомих витрат на видобування нафти. Порівняно малий дебіт мають і нові родовища, що відкриваються [40, 47, 55]. Для забезпечення економічності таких свердловин необхідно перейти від відомих методів видобування до нових технологій, заснованих на сучасній науковій основі [30, 42, 47, 72, 98, 129, 132, 144, 156, 157, 167].

Для видобування нафти на більшості свердловин використовують штангові нафтовидобувні установки (ШНВУ). Суть даного способу експлуатації полягає у тому, що в свердловині розміщують плунжерну помпу, яка приводиться в дію наземним електроприводом. Для цього у свердловину опускається з'єднана з помпою колона штанг, а біля гирла свердловини встановлюють верстат-гойдалку, який приводиться в рух асинхронним двигуном (АД). До ШНВУ входять (рис.1.1): плунжерна глибинна помпа одинарної дії (1), плунжер (2), який здійснює зворотно-поступальний рух; колона з'єднаних між собою труб (3), по яких рідина підіймається на поверхню; колона штанг (4), які в нижній частині з'єднані з плунжером, а у верхній – через полірований шток (5) з головкою балансира (6). Оскільки головка балансира рухається по дузі, а колона штанг повинна рухатись по вертикалі, для її з'єднання з полірованим штоком використовують канатне підвішування штанг. Верстат-гойдалка за допомогою балансира (7) і шатуна (8) перетворює

обертальний рух кривошипного вала редуктора (10) у зворотно-поступальний рух колони штанг і відповідно поршня глибинної помпи, в результаті чого здійснюється підймання рідини всередині колони труб на поверхню. Привід верстата-гойдалки здійснюється електродвигуном (12), шків якого з'єднаний пасовою передачею (11) зі шківом двоступеневого редуктора (10). Для зрівноваження установки використовуються противаги (зрівноважувальні вантажі), як кривошипні (9), так і балансірні (13). Керування роботою електроприводу установки здійснюється за допомогою пуско-регулювальної апаратури з використанням різних систем діагностики та контролю.

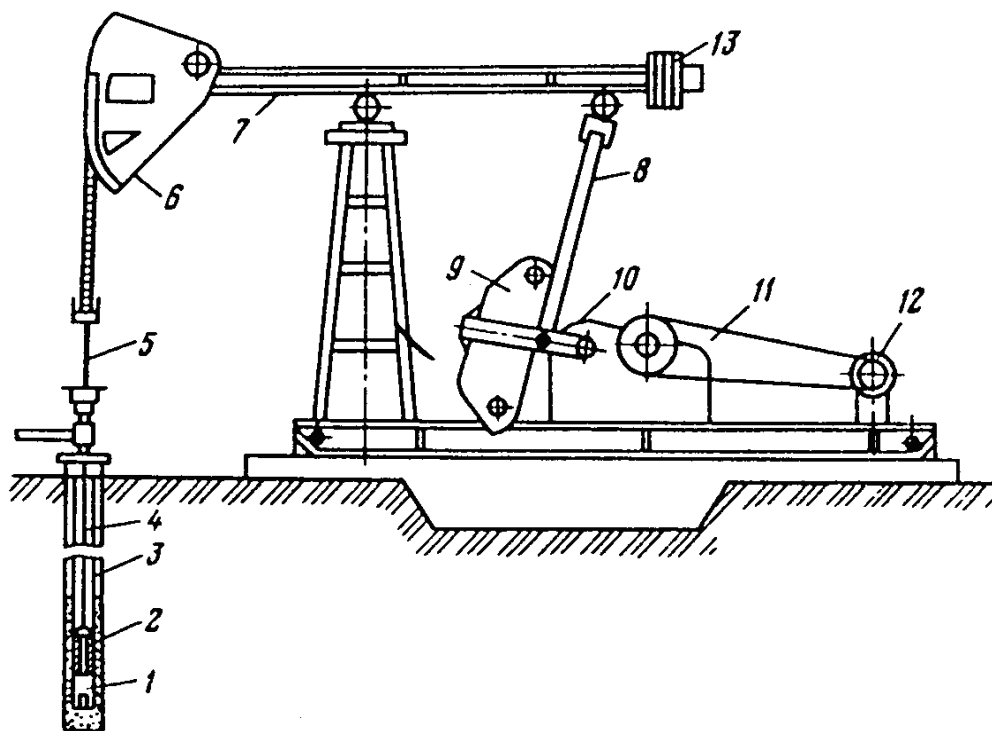


Рис.1.1. Штангова нафтовидобувна установка.

Отже, основними елементами електроприводу ШНВУ є плунжерна помпа, верстат-гойдалка, двигун і система керування. Для приводу верстатів-гойдалок використовують здебільшого АД з короткозамкненим ротором, загальнопромислових [65] або виготовлених спеціально для приводу верстатів-гойдалок [64, 71], як такі, що прості і надійні в експлуатації. Причому оптимальними для приводу ШНВУ є АД з синхронною швидкістю обертання ротора 750, 1000 або 1500 об. за хв.

## 1.2. Загальні принципи побудови систем керування та контролю роботи ШНВУ

Експлуатація свердловин з малим дебітом нафти [2, 6, 19, 22, 30, 31, 93, 132, 147] супроводжується перевищенням теоретичної продуктивності помпи над фактичною. Це зумовлено тим, що відбір нафти невдовзі після введення свердловини в експлуатацію, або через деякий час після ремонту [30] зменшується внаслідок недостатнього заповнення циліндра помпи нафтою. Це не тільки знижує продуктивність роботи ШНВУ і збільшує витрати електроенергії на одиницю видобутої нафти, але й призводить до передчасного зношування елементів установки. Отже, в експлуатації малодебітних свердловин існує потреба в постійному зменшенні інтенсивності відбору рідини із свердловини, що можна здійснити зменшенням частоти гойдань балансира верстата-гойдалки (кількості ходів плунжера попи за хвилину) або зменшенням довжини переміщення плунжера помпи (довжини ходу ввєрх–вниз колони штанг) [29]. Кількість гойдань можна зменшити зміною передавального числа пасової передачі, а довжину ходу полірованого штока – перестановкою пальця на кривошипі. Зазначені способи регулювання є ручними, потребують зупинки роботи установки і, крім того, є дискретними.

Одним з основних завдань видобування нафти штанговими глибинними помпами із малодебітних свердловин є оптимізація режимів відбору рідини із свердловини [6, 60]. Для вирішення цього завдання необхідно, щоб привід ШНВУ забезпечував режими роботи, адаптовані до різних значень допливу рідини у свердловину. Оперативну зміну цих режимів може забезпечити система автоматичного частотного регулювання електропривода змінного струму [6, 15, 73, 108, 109, 112, 122, 124, 148, 153] із зовнішнім контуром регулювання коефіцієнта  $k_z$  заповнення глибинної помпи [77, 87, 89].

Найкращим режимом роботи системи “свердловина – помпа” є режим, за якого встановиться рівновага між кількістю видобутої рідини і продуктивністю пласта, а коефіцієнт заповнення не буде виходити за межі 0,85–0,95. Цього

можна досягнути, регулюючи кількість гойдань верстата-гойдалки так, щоб зберегти встановлене значення коефіцієнта заповнення  $k_z$ . При порушенні рівноваги в системі "свердловина – помпа", коли кількість рідини, що надходить у свердловин [2], є меншою від кількості рідини, що відбирається помпою, коефіцієнт її заповнення зменшується. Робота помпи при незаповненому рідиною циліндрі призводить до збільшення динамічних навантажень на штанги і, як наслідок, до збільшення кількості аварій підземного обладнання [94]. Тому виникає необхідність регулювання частоти гойдань верстата-гойдалки аж до можливості повної зупинки установки на період відновлення наповнення свердловини рідиною.

Висока ефективність періодичної експлуатації може бути досягнута лише за умови створення автоматизованих систем керування електроприводами верстатів-гойдалок. Однак для цього необхідно мати відповідні засоби автоматизованої діагностики і контролю роботи ШНВУ, обробки отриманої інформації, що можна здійснити за допомогою відповідних комп'ютерних програмних засобів і створених на їх основі "інтелектуальних" свердловин та комплексів [45, 98, 110, 133, 150, 156]. Термін "інтелектуальна" свердловина базується на понятті інтелектуального керування, яке пов'язане з поняттям штучного інтелекту з використанням генетичних або еволюційних алгоритмів, нейронних мереж тощо [69, 98, 160].

В ідеальному випадку "інтелектуальна" свердловина може працювати в автономному режимі і повинна задовольняти таким вимогам [98]:

- зв'язок з зовнішніми пристроями через інформаційні мережі;
- наявність засобів самоналагодження і самонавчання;
- можливість прогнозування зовнішніх впливів та зміни умов роботи;
- наявність математичних моделей елементів нафтовидобувної установки і засобів імітаційного моделювання;
- наявність інтелектуальних засобів керування та ідентифікації;
- забезпечення автономного функціонування обладнання під час втрати зв'язку і керуючих впливів від системи верхнього рівня;

- наявність системи моніторингу, прогнозування стану свердловини і обладнання;
- розвинуті засоби візуалізації для прийняття рішень.

Структурна схема типової системи керування родовищем, яке складається з "інтелектуальних" свердловин зображена на рис. 1.2. Слід зазначити, що для різних родовищ така система може відрізнятися кількістю і типом її складових.

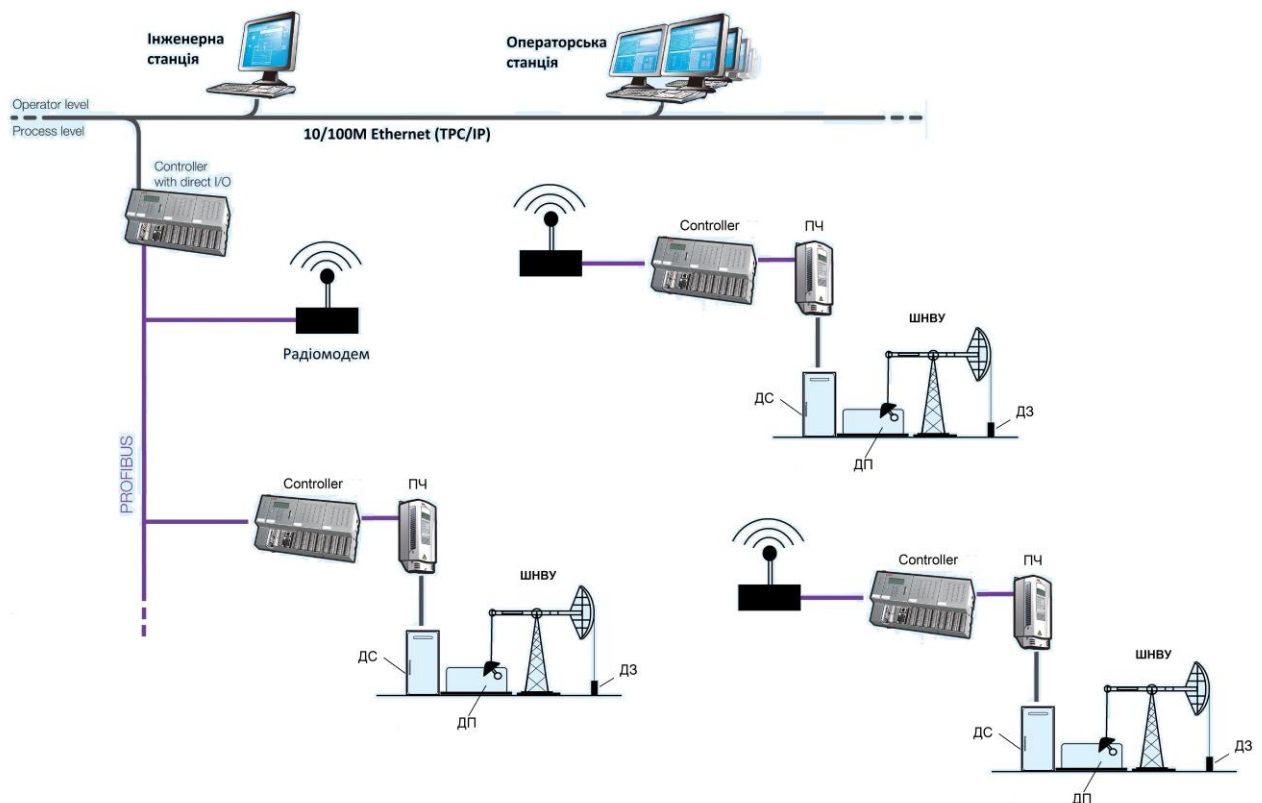


Рис.1.2. Структурна схема системи керування родовищем: ПЧ – перетворювач частоти; ДС – давач струму двигуна; ДП – давач положення кривошипа; ДЗ – давач зусилля.

Ефективність видобування нафти залежить від технологічних параметрів вибраного обладнання, рівня автоматизації свердловини та встановленого режиму роботи. З економічної точки зору основною перевагою "інтелектуальної" системи керування є те, що вона одночасно позитивно впливає на такі показники роботи нафтового родовища:

- збільшує об'єм видобутої нафти;

- зменшує витрати електроенергії на одиницю продукції;
- покращує техніко-економічні показники роботи обладнання;
- збільшує міжремонтний період;
- зменшує затрати на проведення технологічних операцій;
- підвищує надійність та безпеку експлуатації.

Про стан підземного обладнання свердловини можна судити за формою динамограми [41, 54, 57, 59, 62, 114, 117–119, 123, 130, 139, 146], яка під час експлуатації ШНВУ знімається за допомогою датчиків [59, 139], заноситься в комп'ютер і слугує інформацією для прийняття рішення щодо формування сигналів керування установкою. Вона може бути представлена у вигляді залежності сили, що діє на балансир в точці підвішування штанг, від кута  $\alpha$  повороту кривошипа –  $P = P(\alpha)$  або переміщення  $S$  полірованого штока –  $P = P(S)$  [23, 25, 54]. Аналіз форми динамограми є найбільш поширеним і водночас найбільш ефективним способом визначення технічного стану обладнання і встановлення необхідного режиму роботи ШНВУ [4, 59, 119, 123, 141, 151].

Приклад реальної циклічної та розгорнутої динамограми як залежності відносного значення сили  $P^* = P / P_{\max}$ , яка діє на полірований шток, від кута повороту  $\alpha$  кривошипа наведено на рис. 1.3.

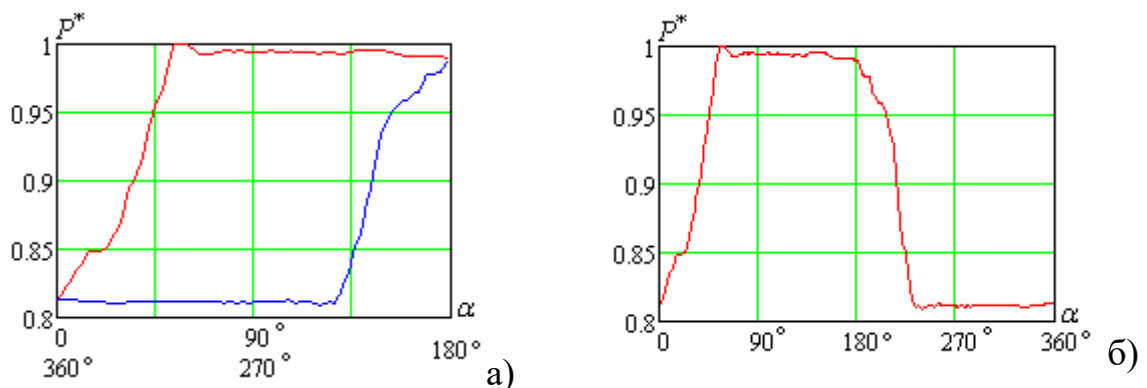


Рис. 1.3. Циклічна (а) та розгорнута (б) динамограми ШНВУ.

Датчики за допомогою яких вимірюються зусилля в полірованому штоці, відрізняються за принципом роботи та представленням вихідного сигналу.

Існують гідравлічні, механічні та електричні давачі. Найбільш поширеними є давачі типу Loadrol (рис. 1.4,а), які кріпляться безпосередньо до штока. Такі давачі виготовляють фірми Interface і Omega (США), а використовують їх в своїх системах Lufkin і eP-Solution (США). Давач Loadrol виготовлений на основі пружного елемента у формі відрізка труби (1), двох компенсаційних (2) та двох навантажувальних (3) тензорезисторів, що утворюють повну мостову схему [57]. Тензорезистори наклеєні на зовнішню поверхню пружного елемента і закриті зверху захисним кожухом.

Поширеним видом давачів зусилля є давач П-подібної форми (рис. 1.4,б). За таким принципом виконані давачі таких виробників, як “Авітрон Ойл”, “Мікон” та багато інших. Цей давач містить два пружних елементи, які з’єднані перемичкою. Тензометричні пластини розміщені на пружних елементах давача і з’єднані в напівмостову схему [57].

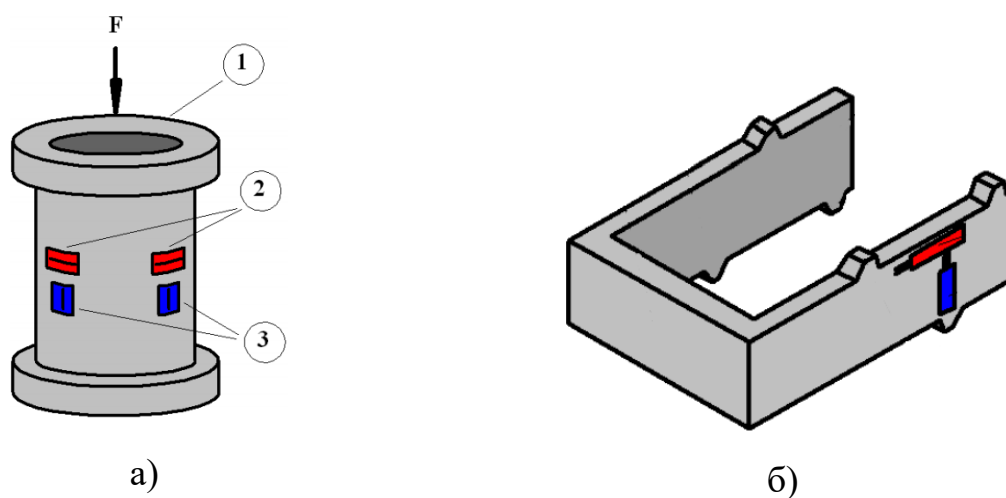


Рис. 1.4. Давачі зусилля: а) давач Loadrol, б) давач П-типу.

На зміну навантаження у полірованому штоці за час одного повного оберту верстата-гойдалки впливає багато різних факторів. Щоб правильно визначати тип динамограми, необхідно знати особливості її побудови при різних умовах роботи глибинної помпи.

Робота плунжерної помпи в ідеалізованих умовах, за яких враховуються лише статичні навантаження від ваги штанг і стовпа рідини, Архімедова сила та



сила пружності матеріалу штанг і труб, характеризується теоретичною динамограмою [23], яка має вигляд паралелограма (рис. 1.5).

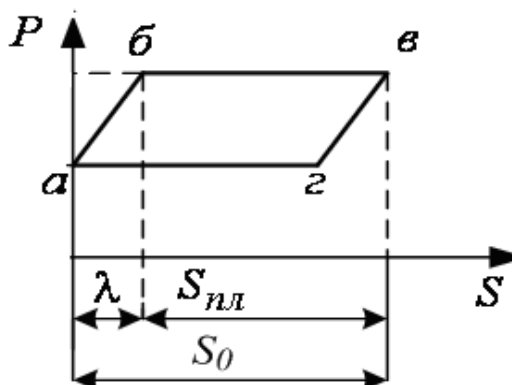


Рис.1.5. Теоретична ідеалізована динамограма:  $P$  – зусилля,  $S_{пл}$  – довжина ходу плунжера,  $S_0$  – довжина ходу головки балансира,  $\lambda$  – видовження штанг.

На рис 1.6 зображена практична динамограма [127] при роботі глибинної помпи за умови справності підземного обладнання та нормальних умовах притоку рідини. Як видно з практичної динамограми роботи глибинної помпи (рис.1.6) лінії розтягу та стиску штанг паралельні одна одній, а теоретично підраховані деформації штанг та труб збігаються з практичними.

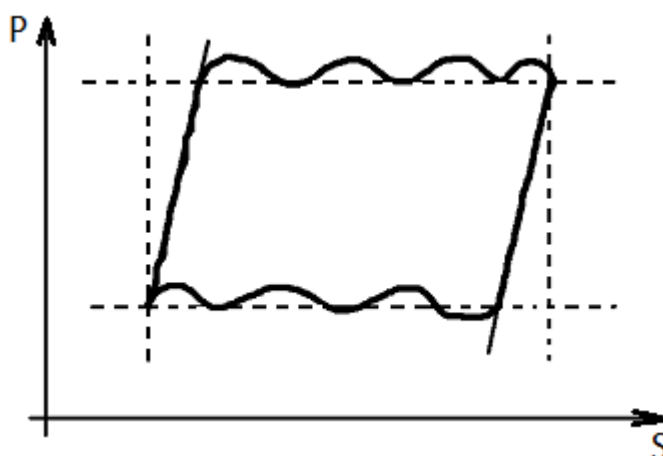


Рис. 1.6. Типова форма практичної динамограми (потовщена крива) за нормальної роботи помпи.

Крім дослідження динамограм, для керування та діагностики нафтовидобувного обладнання використовують методи в основі яких є аналіз

ватметрограм (рис.1.7) [4, 32, 51, 115, 117, 141] або струмограм [37, 69, 123]. Ватметрограма, приклад якої показано на рис.1.7 [141], записується за допомогою ватметрографа, який будує залежність спожитої потужності ШНВУ від положення полірованого штока за один період гойдання верстата-гойдалки за вимірними струмом і напругою в колі живлення двигуна. Вона дає узагальнену інформацію про стан нафтовидобувної установки, а динамограма – підземної частини.

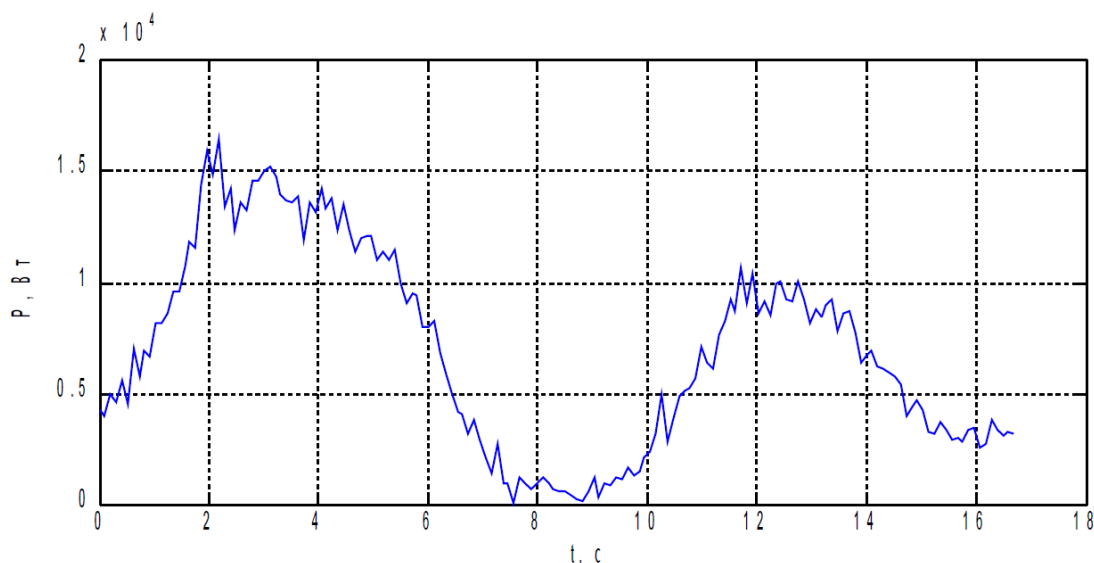


Рис. 1.7. Практична ватметрограма роботи ШНВУ .

### 1.3. Методи розпізнавання динамограм, ватметрограм та струмограм

Найбільш поширеним способом діагностики роботи ШНВУ, особливо для малодобітних свердловин, є динамометрування. Знята динамограма відображає зміну навантаження на полірований шток за період обертання кривошипа, що дає змогу робити висновки про роботу підземного обладнання свердловини, що є основою для налаштування системи керування ШНВУ. Для цього необхідно мати надійні і ефективні алгоритми програмного розпізнавання характерних ознак роботи глибинопомпової установки, що дасть змогу автоматизувати керування та моніторинг процесу нафтовидобування. На теперішній час існує ряд методик, які дають змогу розпізнавати стан нафтовидобувної установки на

основі динамограми. Методи аналізу динамограм базуються на двох основних підходах:

- а) розпізнавання зображення динамограми і порівняння його з еталоном;
- б) візуальний аналіз динамограми оператором, виходячи із наперед заданого режиму роботи помпи.

В технічній літературі описані різні методики аналізу динамограм верстата-гойдалки, виділено характерні ознаки їх зображення та описані закономірності між зображенням динамограми і станом свердловини [4, 17, 28, 36, 41, 59, 67, 68, 114, 117, 119, 139, 140, 153, 162]. Для автоматизації процесу розпізнавання в основному використовуються:

- розпізнавання за допомогою вейвлет-перетворення;
- розпізнавання на основі функціонального базису Уолша;
- розпізнавання з використанням перетворення Фур'є;
- методика Grid Pattern, що аналізує відхилення від еталонів, тобто виявлення окремих ознак (точок) динамограми, які мають місце для кожного режиму роботи ШНВУ;
- методика Белова–Гілаєва, в якій аналізується відхилення від теоретичної динамограми;
- розпізнавання за допомогою нейронної мережі.

Практично всі методи аналізу динамограм потребують значних обчислювальних потужностей і для їх застосування потрібна підготовка великої кількості вхідних даних свердловини (глибина занурення помпи, рівень нафти, її в'язкість і густина, тип і характеристики занурювальної помпи, поточна кількість ходів плунжера, величина ходу полірованого штока, характеристики колони штанг тощо). При цьому ці характеристики можуть безперервно змінюватися в досить широких межах. Зокрема, в процесі нафтовидобутку змінюється величина поточного рівня рідини в свердловині, її густина та в'язкість, тиск в трубах. З часом змінюються і характеристики плунжерної помпи. Тому застосування алгоритмів, що використовують модель свердловини та надземного обладнання для керування та діагностики нафтовидобування

потребує постійної корекції моделі, без якої результати можуть бути суттєво спотвореними. Крім того, деякі з вище перелічених методів взагалі є непридатними для роботи в реальному часі.

В останні роки розробляються і активно впроваджуються нові способи ідентифікації стану нафтової свердловини, засновані на використанні нейронних мереж [41, 67, 69, 101, 128, 129, 157, 158, 165, 168]. На нашу думку, розроблені на їх основі методи є найбільш ефективними для вирішення задач розпізнавання динамограм. У значній мірі ця ефективність залежить від типу нейронної мережі та алгоритму їх навчання. Спочатку суттєвим недоліком цих методик була необхідність мати величезну вибірку вхідних даних для навчання нейронної мережі, оскільки за малої кількості даних мережа неправильно формувала вихідний сигнал. Проте, сучасний розвиток нейронних мереж, нові структури та методи навчання дали змогу суттєво вдосконалити способи розпізнавання зображень не тільки динамограм, але й ватметрограм та струмограм.

Застосування штучних нейронних мереж в системах автоматизації технологічних процесів потребує розв'язання низки задач, характерних для створення інтелектуальних систем керування. Передусім – це задачі структурного та параметричного синтезу нейронної мережі [99, 104, 137]. На етапі структурного синтезу нейронної мережі виконується вибір її архітектури, активаційних функцій нейронів, алгоритму навчання. На етапі параметричного синтезу виконується навчання нейронної мережі. Для навчання мережі, як правило, використовуються методи градієнтного спуску, зокрема алгоритм зворотного поширення похибки і його модифікації. Слід зазначити, що саме другий етап ставить найвищі вимоги до обчислювальних ресурсів і займає 50–90% часу вирішення задачі.

Під час процесу навчання з експериментально (чи іншим шляхом) отриманих наборів даних традиційно формують дві підмножини, що не перетинаються і, як правило, хронологічно впливають одна з іншої. Одна з них є навчальною вибіркою, на якій буде виконуватися навчання нейронної

мережі. Інша підмножина – контрольна (тестова) вибірка, що не використовується в процесі навчання нейронної мережі і застосовується тільки для перевірки якості роботи.

Слід відзначити, що набір вхідних даних визначає розмірність вхідного шару штучної нейронної мережі й істотно впливає на результат синтезу. Від складу, повноти, якості навчальної і тестової вибірок значною мірою залежать час навчання нейронної мережі і похибка одержуваних результатів. Таким чином, процес формування навчальних даних поєднується з навчанням нейромережі і є ітераційною процедурою, на кожній ітерації якої приймається рішення про достатність підмножини навчальних даних, як репрезентативної вибірки усієї множини даних. Перевірка репрезентативності підмножини навчальних даних досягається формуванням підмножини верифікації, а також якістю результатів, отриманих на тестовій підмножині.

Остаточна структура штучної нейронної мережі у більшості випадків є результатом багатократних експериментів з нею. Основним недоліком нейромереж є відсутність універсального підходу для їх синтезу. Тобто, під кожен конкретну задачу необхідно створювати та налаштовувати свій вид мережі. Штучні нейронні мережі класифікують за параметрами [53, 66, 104, 137, 154, 155], які показані на рис.1.8.



Рис.1.8. Характеристики, за якими класифікують нейронні мережі.

За способом навчання нейронні мережі поділяють на такі, що використовують навчання з учителем і ті, що використовують навчання без вчителя [52].

Нейронні мережі у залежності від способу налаштування вагових коефіцієнтів нейронів поділяють на:

- мережі з фіксованими зв'язками, в яких вагові коефіцієнти нейронної мережі вибираються відразу, виходячи з умов задачі;
- мережі з динамічними зв'язками, в яких налаштування синаптичних ваг відбувається в процесі навчання.

Основною характеристикою для класифікації нейронних мереж є їх структурна модель. Від правильного вибору структури залежить працездатність всієї системи. Структуру мережі вибирають відповідно до поставлених цілей з урахуванням всіх факторів впливу та розумінням алгоритму роботи майбутньої системи. Основними структурами нейронних мереж, що застосовуються в системах керування технологічними процесами та об'єктами, є нейронні мережі прямого поширення – НМПП (feed-forward neural networks – FFNN) [104, 137, 155] та рекурентні нейронні мережі – РНМ (recurrent neural networks – RNN) [104, 137, 155], що містять зворотні зв'язки (рис.1.9).

В мережі прямого поширення всі зв'язки спрямовані строго від вхідних нейронів до вихідних. Це мережа, яка містить послідовно розміщені вхідний, один або декілька внутрішніх і вихідний шар нейронів. Переважно навчається за методом зворотного поширення похибки, що потребує наявності пари "вхідний вектор – "правильний" вихід". В процесі навчання вхідний вектор подається на вхід мережі, а вихідний порівнюється з бажаним. Розбіжність (похибка) поширюється в зворотному напрямку по зв'язках мережі для корекції ваг нейронів. Повторення цієї процедури відбувається доти, поки не досягається допустима величина похибки. Мережа такого типу добре справляється з задачами, де вихідний вектор не є динамічним і залежить тільки

від вхідних даних. До недоліків можна віднести тривалий час навчання, а також те, що така мережа погано працює з суттєво нелінійними сигналами.

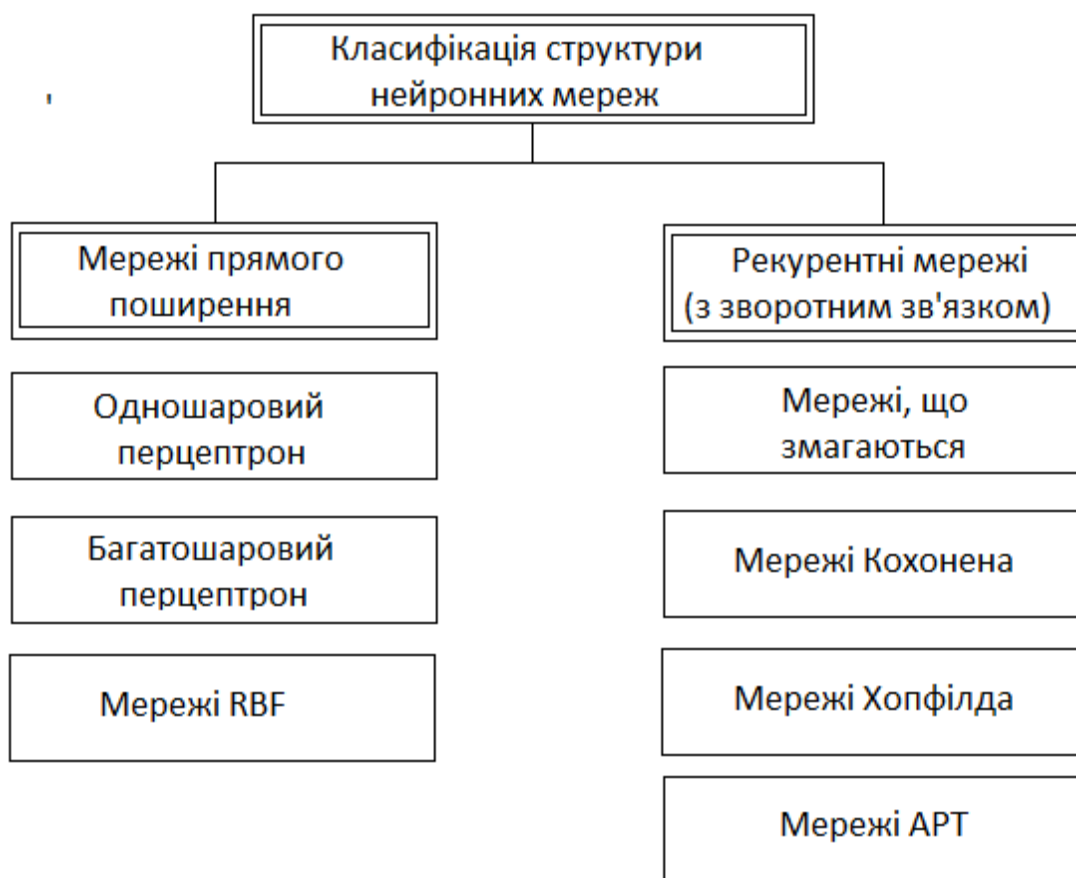


Рис.1.9. Класифікація структур нейронних мережі.

В рекурентних нейронних мережах у порівнянні з мережами прямої дії є зв'язок вихідного сигналу з вхідним. Завдяки зворотним зв'язкам в такій мережі модифікуються входи нейронів, що призводить до зміни стану мережі. Поведінка рекурентних мереж описується диференціальними або різницевиими рівняннями, як правило, першого порядку. Це набагато розширює області застосування нейромереж і способи їх навчання. Такий тип мереж дає змогу обробляти не окремо взяті набори даних, а зміну процесу, що використовують для керування динамічними системами. Для навчання мережі використовують той самий алгоритм зворотного поширення похибки, але з врахуванням рекурентного зв'язку. Недоліком застосування таких мереж є ускладнений

алгоритм навчання та необхідність великої кількості як вхідних, так і вихідних даних. При неправильному виборі форми представлення даних алгоритм навчання може зациклюватись або призводити до збільшення похибки.

Мережа радіально-базисних функцій RBF [99, 104, 129] – вид нейронної мережі, що має прихований шар з нелінійних і вихідний шар з лінійних елементів. Мережі цього типу досить компактні і швидко навчаються. В основному цей тип нейронних мереж застосовується для апроксимації

Самоорганізовані карти, або мережі Кохонена [137, 159, 165], – це такий клас мереж, які навчається без вчителя і успішно застосовується в задачах розпізнавання. Мережі такого класу здатні виявляти новизну у вхідних даних: якщо після навчання мережа зустрінеться з набором даних, несхожим ні на один з відомих зразків, то вона не зможе класифікувати такий набір і тим самим виявить його новизну. Мережі Кохонена часто застосовують для кластерного аналізу.

Існує тип нейронних мереж, який відносять до класу класифікаторів. Більшість з них мають архітектуру описану Хопфілдом [137, 157, 159]. Вона складається тільки з одного шару нейронів, число яких є одночасно числом входів і виходів мережі. Основним їх недоліком є те, що мережа може працювати тільки з бінарними даними. Крім того, якщо вхідний вектор сильно зашумлений (відстань Хемінга перевищує 60% від загальної кількості елементів), то значно зменшується відсоток розпізнавання і збільшується кількість хибних спрацювань.

З наведеного аналізу основних типів нейромереж випливає, що рекурентні мережі є найбільш придатними для вирішення задач класифікації зображень. Це дає змогу використовувати їх в системах реального часу для моніторингу та керування ШНВУ.



#### **1.4. Огляд апаратних засобів для реалізації систем керування роботою ШНВУ**

Використання сучасних інтелектуальних контролерів [67, 98, 138, 139] дає можливість вирішувати задачі автоматизації роботи глибиннопомпового обладнання, оптимізації режимів його роботи, виявлення аварійних ситуацій, оперативної передачі інформації про стан об'єкту на пульт оператора за допомогою системи телемеханіки. На сьогоднішній день системи телемеханіки будуються на основі радіо або GSM-каналу [142, 144].

Типовий блок керування складається з контролера, частотного перетворювача або силового комутатора (якщо потрібне тільки вмикання і вимикання електроприводу), GSM-модема і набору датчиків технологічних параметрів. Кожен такий блок має зв'язок з диспетчерським пунктом, де здійснюється керування всім родовищем.

На сьогодні відомий цілий ряд виробників контролерів та блоків керування для ШНВУ. Зокрема, найпоширенішим в світовій практиці контролером для ШНВУ є SAM WELL MANAGER фірми Lufkin (США) [44]. В ньому передбачено підключення аналогових датчиків зусилля і положення, а також дискретних датчиків положення, що розміщуються на валу двигуна і редуктора. Дані з цих датчиків використовуються для контролю і керування роботою помпової установки, а також для візуального відображення графічних даних на дисплеї блоку керування (якщо такий передбачений).

В контролері SAM WELL MANAGER передбачено такі режими роботи:

1. Ручний – керування привідним двигуном виконуються з диспетчерського пункту.
2. Автоматичний – керування привідним двигуном виконуються за заданими наперед часовими інтервалами (періодична експлуатація) або за результатами аналізу динамограм.

Недоліком системи керування на базі SAM WELL MANAGER є її висока вартість, складність налаштування для автоматичної роботи та відсутність аналізу наземного обладнання.

Існує ряд контролерів з аналогічними параметрами [143]: контролери SAC200, SAC8800 фірми “eProduction Solutions”(США), контролери ePIC, ePAC, AEPOC2100 фірми “Automation Electronics ”(США), контролери Diamond Series Rod Pump фірми “International Automation Resources” (США) та ін.

Досить оригінальною розробкою є контролер iBEAM фірми “eProduction Solutions” [52, 59], що встановлюється безпосередньо на балансірі верстатогойдалки. На його верхній поверхні розміщена сонячна батарея, що забезпечує автономну роботу. Для роботи в нічний час передбачена акумуляторна батарея. Оскільки в такій системі відсутні кабельні з'єднання, то виміряні та розраховані динамограми передаються за допомогою малопотужного радіопередавача на термінал, що розміщений біля блоку керування привідним двигуном. Така система має більшу надійність, але є досить дорогою у встановленні.

Досить поширеними є контролери ALC600 фірми АВВ [13], які експлуатуються і в Україні. Блоки керування з цим контролером призначені для електродвигунів потужністю від 6 до 100 кВт.

Останнім часом з'являються розробки “бездавачевих” контролерів ШНВУ, що не потребують для своєї роботи зовнішніх давачів [57, 139]. Найбільш відомими є розробки фірми “SPOC Automation” (США) та “R&M Energy Systems” (США). Інформація в цих системах розраховується на основі електричних параметрів і ватметрограми. Завдяки відсутності давачів суттєво зменшується вартість системи керування, підвищується надійність, зменшується час монтажу та заміни комплектуючих, однак суттєвим недоліком є невисока точність визначення стану свердловини, що негативно впливає на результати діагностування і відповідно якість керування.

Американською компанією "Echometer" розроблена система дослідження роботи свердловин "Аналізатор". Вона є комплексом вимірювальних давачів. Керування їх роботою і обробка отриманої інформації здійснюється

комп'ютером. На свердловинах із ШНВУ дана система застосовується для динамометричного дослідження навантаження на полірованому штоці, визначення переміщення полірованого штока і споживаного двигуном струму в реальному часі.

В Україні в основному експлуатуються програмно-апаратні комплекси, які призначені для здійснення поточного контролю за станом свердловини. До них можна віднести російські розробки НВО "СИАМ" (комплекс "СИДДОС"), ТОВ "СТК ГЕОСТАР" (комплекс "Ехолот-динамограф ГЕОСТАР-111"), ТОВ "МІКОН" (комплекс МІКОН-101) [14, 36, 115, 143]. Ці комплекси призначені для контролю і вимірювання робочих характеристик штангових глибинних pomp: силових навантажень в різних положеннях полірованого штока, довжини ходу, числа коливань балансира, наявності витоків в глибинному обладнанні, динамограми ШНВУ. Дані вимірювань записуються в енергонезалежну пам'ять електронного блоку і далі можуть бути передані в базу даних. Однак перелічені комплекси призначені для діагностики окремої свердловини і не придатні для керування електроприводом верстата-гойдалки.

### **1.5. Аналіз мікропроцесорних засобів для реалізації алгоритму керування роботою ШНВУ**

Одним з основних елементів системи керування нафтовидобувною установкою є блок збору та обробки інформації. Центральним елементом цього блоку є мікроконтролер. Основними вимогами до мікроконтролерів, які використовуються в системах керування, є [169, 172]:

- а) висока швидкодія;

- б) обробка даних з плаваючою комою;
- в) достатній для обчислень обсяг оперативної та постійної пам'яті;
- г) наявність інтерфейсів для зв'язку із зовнішньою периферією;
- д) простота в розробці програмного забезпечення з можливістю внутрішньосхемного налагодження;
- е) висока надійність.

Остаточний вибір мікропроцесорної платформи залежить від великої кількості різних факторів, включаючи економічні. Зазвичай, основною умовою залишається отримання максимально вигідного співвідношення "ціна – продуктивність – енергоспоживання", зумовленого складністю задачі.

Одним із перших мікроконтролерів в світі був Intel 8051. На його основі побудовано більшість світових розробок в галузі автоматизації промислових процесів. В середині 1990-х років почалася розробка нового 8-розрядного мікроконтролера AVR фірми ATMEL, який став базою для створення сучасних високопродуктивних і економічних багатоцільових контролерів [168, 172]. На даний момент співвідношення "ціна – продуктивність – енергоспоживання" для AVR є одним з кращих на світовому ринку 8-розрядних мікроконтролерів.

Покращена RISC (enhanced RISC) архітектура AVR мікроконтролерів (рис. 1.10) [27] об'єднує в собі комплекс рішень, які підвищують швидкодію ядра AVR. Арифметико-логічний пристрій (ALU), в якому виконуються всі обчислювальні операції, має доступ до 32-оперативних регістрів, об'єднаних в файл. Вибірка вмісту регістрів, виконання операції і запис результату назад в регістровий файл виконуються за один машинний цикл.

Вся програмна пам'ять AVR-мікроконтролерів виконана за технологією FLASH і розміщена на кристалі. У FLASH-пам'ять, крім програми, можуть бути записані постійні дані, які не змінюються під час функціонування мікропроцесорної системи. Це різні константи, таблиці знакогенератора, таблиці лінеаризації датчиків та ін. Крім того, для зберігання даних AVR-мікроконтролери можуть мати, залежно від типу кристала, внутрішню і

зовнішню оперативну SRAM пам'ять і енергонезалежну внутрішню EEPROM пам'ять. Програмування енергонезалежних блоків пам'яті AVR може здійснюватися як паралельно, так і послідовно через SPI (Serial Peripheral Interface) інтерфейс. Керування та обмін даними з EEPROM-пам'яттю і з усіма периферійними вузлами здійснюється за допомогою регістрів введення-виведення, які є в кожному периферійному вузлі.

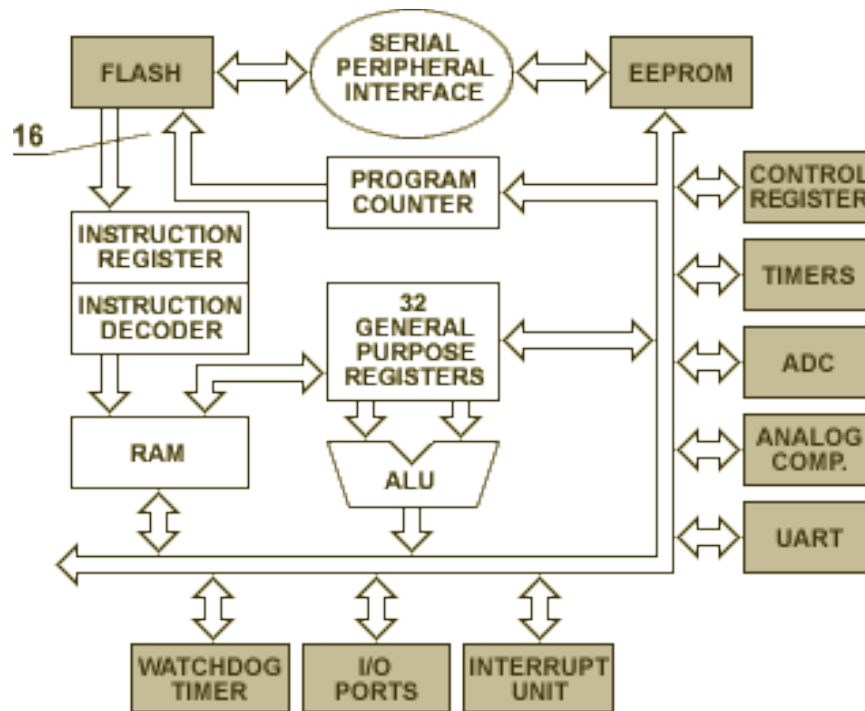


Рис.1.10. Архітектура AVR-мікроконтролерів

На сьогоднішній день доступно близько 240 типів ARM-мікроконтролерів від численних виробників. Зокрема, компанія ST Microelectronics випускає мікроконтролери на базі нового ядра ARM Cortex-M3 STM32 [166]. Ці пристрої здатні виконувати алгоритми керування в реальному часі при низькому енергоспоживанні. На відміну від інших ядер ARM, сімейство Cortex має завершене процесорне ядро зі стандартним ЦПУ і системною архітектурою (рис. 1.11) [166], яка має три основних профілі:

- профіль А для високопродуктивних додатків;
- профіль R для додатків, що працюють в реальному часі;
- профіль М для бюджетних програм.

У STM32 використовується профіль Cortex-M3, розроблений спеціально для систем, що поєднують в собі високу продуктивність і низьке енергоспоживання. Ця архітектура дає можливість повністю вирішувати всі задачі, які пов'язані з керуванням ШНВУ.

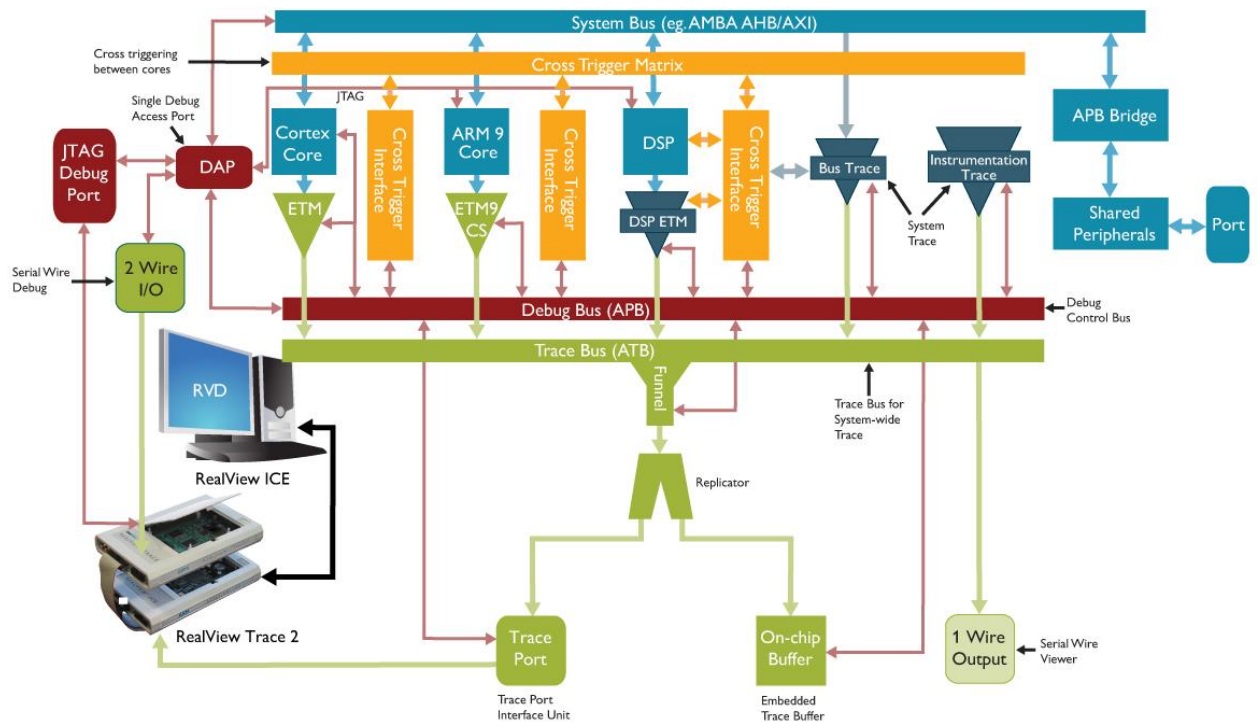


Рис. 1.11. Архітектура мікроконтролерів сімейства ARM Cortex

В порівнянні з вищеописаними мікроконтролери STM32 мають такі переваги:

1) Повністю 32-бітна архітектура, завдяки чому збільшується кількість операцій за той же час, ніж 8-ми і 16-бітові мікроконтролери.

2) Велика кількість (від 16) регістрів загального призначення, що дає можливість більше часу працювати з даними в регістрах, без звертання до пам'яті.

3) Повноцінне відлагодження алгоритму по інтерфейсу JTAG або SWD. Наприклад, можна ставити точки переривання (до 240 переривань), переглядати вміст змінних і регістрів, виконувати програму покроково і т.п.

4) Наявність контролера DMA (Direct Memory Access), яка дає можливість для периферійних пристроїв читати/писати в RAM без участі мікроконтролера.

Завдяки цьому можна виконувати деякі задачі в фоні, не завантажуючи мікроконтролер.

5) Висока щільність коду. Для більшості складних алгоритмів розмір коду буде менший, ніж для багатьох інших мікроконтролерів. Це досягається завдяки спеціально розробленого набору інструкцій Thumb-2.

6) Загальна орієнтованість набору інструкцій на компілятори мови C/C++.

7) Зручні засоби розробки. Для користувачів Windows та Linux існує безкоштовне та просте у використанні середовище CoIDE від фірми CooCox.

## 1.6. Вибір напрямку досліджень

Способи видобування нафти розроблялись, розвивались і вдосконалювались протягом багатьох десятиліть. Зусиллями вчених і інженерів в царині нафтовидобування розроблені науково-теоретичні засади прогнозування і розвідки та практичної експлуатації нафтових родовищ. Розроблено методи моніторингу і автоматизації роботи як окремих свердловин [28, 127], так і цілих родовищ [96, 127]. В роботі розглядаються проблеми видобування нафти штанговими глибинними помпами як такими, що найбільш поширені в практиці видобування нафти. Теоретичні наукові основи та інженерні рішення такого способу видобування викладені в фундаментальних працях [1, 7, 18, 25, 36, 38, 47, 55, 63, 97, 104 і ін.] та багатьох журнальних публікаціях, кількість яких постійно зростає. Проте багато проблем залишаються або не вирішеними зовсім у зв'язку з новими умовами експлуатації, які створились, або потребують вирішення на новій матеріально-технічній базі. Ставиться задача розроблення нових підходів до експлуатації нафтових родовищ на основі сучасних наукоємних технологій, в тому числі й розвитку інтелектуальних систем керування. Зокрема, потребує нового вирішення проблема підвищення ефективності роботи родовищ, запаси нафти в яких значно вичерпані і перебувають на стадії пізньої розробки [19, 22, 131]. В

Україні такі родовища складають більшу частину загального фонду [40, 55] і, незважаючи на малий дебіт свердловин, загальний видобуток з них складає значну долю в загальній кількості видобутої нафти. Внаслідок великої кількості малодобітних свердловин питання покращення їх техніко-економічних показників мають важливе значення. Важливого значення набуває розвиток інноваційних технологій [68, 101, 167], створених на основі комп'ютерних засобів і програмного забезпечення [36, 89, 96, 116, 120, 127, 130].

Оскільки обладнання свердловини вибирається, виходячи з умов роботи на час введення її в експлуатацію, то з плином часу його потужність перевищує необхідну. На практиці заповнення циліндра помпи через деякий час після запуску установки знижується до 40–60% [49]. Робота установки зі значним незаповненням циліндра помпи рідиною внаслідок недостатнього дебіту свердловини або невідповідності частоти гойдань балансира притоку рідини до свердловини призводить не тільки до збільшення споживання реактивної потужності [93], але й супроводжується іншими негативними явищами. Ефективність видобування нафти з малодобітних свердловин залежить як від належного вибору нафтовидобувного обладнання, так і встановленого режиму його роботи. Здебільшого їх переводять в режим періодичної експлуатації [2, 19, 31, 127, 132, 152], однак на практиці економія електроенергії при цьому не забезпечує економічної роботи установки в цілому. Часті пуски та зупинки призводять до підвищеного зношування обладнання, і, крім того, породжують низку проблем. Зокрема, упродовж відведеного для наповнення свердловини проміжку часу в ній може накопичуватися пісок, що спричинить значне підвищення моменту навантаження під час чергового пуску установки.

В останні роки завдяки розвитку частотних перетворювачів і мікропроцесорної техніки [112, 51] малодобітні свердловини переводять з періодичної роботи на неперервну. Зміна дебіту свердловини потребує зміни темпу відбору нафти, що зводиться до встановлення відповідних різних швидкостей гойдань балансира. Регулювання швидкості електроприводу ШНВУ потребує вирішення питання визначення низки різних показників:



діапазону регулювання, гранично допустимих меж зміни моменту навантаження, величини струму статора тощо. Однак, як показують розрахунки, швидкість обертання кривошипа не завжди можна змінювати в необхідних межах, оскільки при цьому можуть виникати перевантаження АД як за нагріванням [48], так і максимальним значенням моменту навантаження [65]. Для визначення допустимих меж зміни темпів відбору нафти і формування обмежень необхідно провести попередні дослідження, а найкраще це можна здійснити лише шляхом математичного моделювання [111, 121, 164].

Для здійснення будь-якого регулювання необхідно встановити необхідні залежності вихідних величин об'єкту регулювання від вхідних. Складність вирішення цієї проблеми для електроприводу ШНВУ зумовлена двома факторами. По-перше, вхідною величиною є не скалярне значення моменту навантаження, а його функціональна періодична залежність. По-друге, залежність між зусиллям, яке діє на балансір в точці підвішування зв'язаних з помпою штанг, і моментом на валу АД визначається складною нелінійною кінематичною залежністю, яка трансформує періодичний закон зміни зусилля в зумовлену ним періодичну залежність моменту навантаження. До цього слід додати, що АД електроприводу ШНВУ постійно працює в динамічному режимі і має нелінійну залежність між моментом навантаження АД і електромагнітним моментом [90].

Неперервний розвиток і удосконалення технологій видобування нафти штанговими глибинними помпами призвів до розроблення станцій керування їх роботою [13–15]. Однак вони виконані практично на однотипній елементній базі і мають приблизно однакові ресурси пам'яті та швидкодію [144]. Відмінність станцій систем керування відомих фірм в основному залежить від наявних в них програм і алгоритмів оброблення отриманої технологічної інформації: динамограм, ваттметрограм, динамічного рівня свердловин тощо, які слугують основою для аналізу роботи і керування.

Проблему забезпечення ефективної роботи ШНВУ, у тому числі й невідповідність відбору нафти її притоку, можна розв'язати лише на основі

комплексної математичної моделі двигуна, верстата-гойдалки і системи керування у їх взаємозв'язку. Першим кроком при цьому є ідентифікація динамограми і встановлення взаємозв'язків між її типом і частотою гойдань балансира та законом керування електроприводом верстата-гойдалки. Розв'язання цієї задачі дасть змогу удосконалити методи керування роботою ШНВУ, визначити обмеження, які зумовлені специфікою роботи її електроприводу, і тим самим підвищити енергоефективність і надійність та збільшити міжремонтний період роботи ШНВУ [24, 30, 31].

Важливою проблемою, яка потребує постійної діагностики стану глибиннопомпового обладнання, є встановлення раціональних режимів експлуатації свердловин як у режимі неперервної, так і періодичної їх роботи, а також попередження аварійних ситуацій. Нафтовидобувні установки родовища розміщені на великій території, а це зумовлює необхідність застосування діагностування і керування функціонуванням усіх свердловин з диспетчерського пункту [96, 144]. Для автоматичного керування необхідно безперервно отримувати інформацію про всі контрольовані параметри встановленого на родовищі обладнання. Надійний контроль і автоматизація дають змогу підвищити ефективність видобування нафти і значно скоротити простої обладнання, зменшити ймовірність або й виключити зовсім аварійні ситуації, зменшити витрати на профілактичний ремонт.

Сучасні комп'ютерні технології дають змогу замінити звичайний приладовий, візуальний та ручний контроль автоматизованим моніторингом, який працює в реальному масштабі часу. Для цього потрібні комп'ютерні програмні засоби, які спроможні з високою достовірністю і швидкодією аналізувати протікання технологічного процесу і формувати оптимальний алгоритм керування технологічним процесом в реальному часі. На базі таких програм можна створити інтелектуальну систему моніторингу та керування роботою не тільки окремою установкою, але й цілим нафтовим родовищем [96, 98, 110, 130, 150, 156, 167, 172]. Отримані за допомогою комп'ютерного аналізу дані дають змогу передбачити зміну експлуатаційного стану свердловини і

спрогнозувати її роботу. У зв'язку з розосередженістю нафтових свердловин на значних територіях важливого значення набуває проблема розроблення інтелектуальних систем керування [72, 98, 110, 130, 133, 150, 156, 167, 172], а це потребує розвитку і вдосконалення методів діагностики і контролю роботи як наземного, так і підземного обладнання [116].

### **Висновки**

1. Аналіз літературних джерел свідчить, що на теперішній час існує широкий вибір готових рішень, які дають змогу діагностувати роботу ШНВУ та встановлювати її раціональний режим роботи. У більшості з них вхідною інформацією є динамограма або ватметрограма. На нафтовидобувних родовищах в Україні майже відсутні автоматизовані системи керування роботою ШНВУ провідних світових виробників з причини їх значної вартості. Натомість використовуються переносні діагностичні комплекси, які не можуть забезпечити автоматичне керування нафтовидобувними установками в реальному часі. Отже, удосконалення в напрямі підвищення ефективності та надійності систем керування роботою ШНВУ потребує нових теоретичних і практичних рішень, придатних для реалізації в інтелектуальних системах.

2. Одним з основних завдань під час синтезу автоматизованої системи керування ШНВУ є вибір способу обробки вхідної інформації та створення алгоритму ідентифікації стану обладнання свердловини. Більшість існуючих методів розпізнавання динамограм потребують значної кількості вхідних даних, що суттєво обмежує їх застосування у системах реального часу. Найбільш придатними на теперішній час є методи, що базуються на теорії штучних нейронних мереж. У порівнянні з класичними підходами, використання штучних нейромереж дає змогу більш ефективно вирішувати такі задачі, як автоматизація процесу розпізнавання сигналів і реалізація адаптивного керування.

3. Результати застосування штучних нейронних мереж в системах автоматизації процесів нафтовидобутку в значній мірі залежать від структури

неймережі та її параметричного синтезу. Аналіз існуючих основних типів нейронних мереж показав, що для створення інтелектуальних систем керування роботою ШНВУ найбільш придатними є рекурентні нейронні мережі, оскільки вони краще адаптуються до зміни характеристик свердловини та її обладнання.

4. Для здійснення автоматичного керування ШНВУ необхідно неперервно отримувати інформацію про контрольовані параметри встановленого на свердловині обладнання. Однак обладнання, яке експлуатується на вітчизняних нафтових родовищах не придатне для здійснення одночасного моніторингу стану ШНВУ та керування електроприводом верстата-гойдалки. Тому актуальною задачею є створення на базі сучасної мікропроцесорної техніки системи керування, яка забезпечує раціональний режим роботи нафтової свердловини в режимі реального часу.

5. Важливим питанням під час синтезу автоматизованої системи керування ШНВУ є вибір програмно-апаратної бази. В процесі вибору слід враховувати такі фактори, як швидкість оброблення великої кількості даних, можливість обміну інформацією з базою даних на зовнішніх носіях, підтримка сучасних файлових систем (fat32, NTFS), наявність інтерфейсів для зв'язку з зовнішньою периферією (USART, SPI, USB, ETHERNET), обсяг енергоспоживання, зручність в налагодженні та експлуатації.

## РОЗДІЛ 2

### ПОБУДОВА СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ ШНВУ

#### 2.1. Структура системи керування нафтовидобувною установкою

Сучасний рівень розвитку нафтовидобувної промисловості потребує комплексного підходу до розроблення системи автоматичного керування (САК) нафтовидобувними установками та комплексами. Це зумовлено, з одного боку, необхідністю підвищення якості керування при мінімальних затратах на створення та експлуатацію систем, а з іншого – ускладненням структури об'єкта керування, збільшенням функцій, які він повинен виконувати, і, як наслідок, збільшенням факторів невизначеності, які необхідно враховувати для керування об'єктом.

Підвищення ефективності та надійності роботи устаткування родовища потребує встановлення сучасних мікропроцесорних контролерів, які роблять можливим безперервний автоматичний контроль технічних параметрів [5, 31, 41, 54, 98, 123, 144, 146, 172]. Стосовно свердловин, що експлуатуються за допомогою ШНВУ, це означає вимірювання та розрахунок таких параметрів, як динамограма, динамічний рівень, ватметрограма, тиск в гирлі свердловини, добова продуктивність свердловини тощо.

Використання сучасних інтелектуальних контролерів [67, 98, 138, 139] забезпечує досягнення таких цілей, як автоматизація роботи верстата-гойдалки, оптимізація режимів роботи обладнання, оперативне виявлення аварійних ситуацій та невідповідності режимів експлуатації обладнання, оперативна передача інформації про стан об'єкта на пульт оператора телемеханічними засобами. Розробка нових методів інтелектуального керування та створення зразків нової техніки на основі нейронних мереж розвивається в даний час всіма провідними електротехнічними компаніями [129, 155, 158].

Системи телемеханіки на сьогоднішній день будуються, як правило, з використанням радіоканалу або GSM зв'язку [96], рідше провідного каналу. Тому типова станція керування включає в себе контролер, частотний перетворювач для регулювання режимів роботи електродвигуна, GSM (радіо)-модем і набір датчиків технологічних параметрів [74].

Найбільш ефективно можна використати для керування та діагностування свердловин з штанговими глибинними помпами динамограму верстата-гойдалки [22, 40, 55, 59, 62], яка дає можливість виявити всі особливості роботи свердловин промислу (рис.2.1). В роботі пропонується не розраховувати динамограму за кожен цикл роботи, а безпосередньо розпізнавати зображення динамограми. Це суттєво пришвидшить роботу системи керування без втрати якісних показників. Як вже згадувалось, найефективнішим методом розпізнавання зображень, є метод в основі якого лежить алгоритм роботи нейронної мережі.

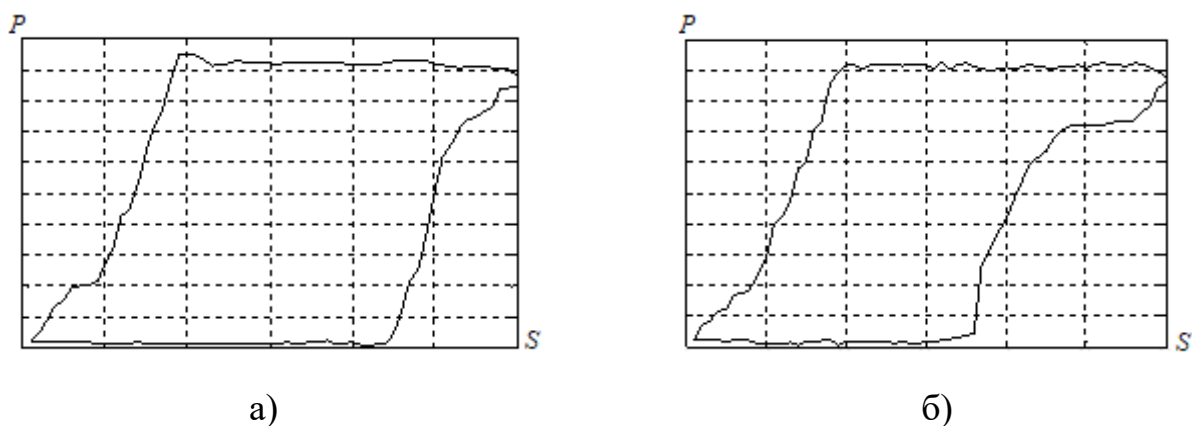


Рис. 2.1. Типові динамограми зняті з ШНВУ при коефіцієнті заповнення рівному 0.95(а) та 0.75(б).

Таким чином, для забезпечення оптимального режиму роботи установки із штанговою глибинною помпою пропонується система електропривода, яка плавно регулює продуктивність помпи у функції коефіцієнта заповнення. Сам коефіцієнт заповнення визначається штучною нейронною мережею на основі інформації з датчика зусилля на полірованому штокові та датчика положення кривошипа верстата-гойдалки (рис. 2.2).



Рис. 2.2. Структурна схема системи керування електроприводом ШНВУ з нейронною мережею.

Структурна схема складається з електромеханічної та “інтелектуальної” частини. Електромеханічна частина схеми містить верстат-гойдалку, асинхронний двигун, перетворювач частоти та регулятор. “Інтелектуальна” частини схеми реалізована на мікроконтролері, що під’єднаний до датчиків та перетворювача частоти таким чином, щоб мати можливість на основі зібраних даних визначити коефіцієнт заповнення помпи  $i$ , відповідно, задавати швидкість обертання двигуна.

Мікроконтролер працює за заданим алгоритмом в декілька етапів. На першому етапі проводиться збір та перетворення вхідних даних від датчика зусилля та кінцевих датчиків крайніх положень кривошипа. Кінцеві датчі потрібні для точного визначення періоду обертання кривошипа. Алгоритм мікроконтролера реалізовано для двох випадків реалізації системи керування: з використанням датчика зусилля та без нього, коли є датчі струму статора привідного двигуна. У першому випадку вхідною величиною є динамограма, а в другому – струмограма за період обертання кривошипа. Паралельно до обробки даних формується база даних з типовими динамограмами

(струмограмами) та відповідними їм коефіцієнтами заповнення помпи. Їх можна отримати двома способами, які передбачено в алгоритмі – експериментальним шляхом або використовуючи створену математичну модель штангової глибинної установки.

На наступному етапі вхідні дані опрацьовує нейронна мережа, яка спроектована таким чином, щоб вибрати найбільш подібну до вхідної типову динамограму (струмограму) та відповідний їй коефіцієнт заповнення. Далі на основі здійсненого вибору формується керуючий вплив на частотний перетворювач, який задає певну частоту обертання привідного двигуна і, відповідно інтенсивність відбору нафти з свердловини. Ефективність роботи такої системи залежить від багатьох факторів: структури і параметрів нейронної мережі, формування вхідних даних для навчання мережі та її роботи, адекватність математичної моделі установки тощо.

## **2.2. Обробка вхідних і вихідних даних**

Як вже згадувалося у першому розділі, методи на основі нейронних мереж є найбільш ефективними для задач розпізнавання зображень. Першочерговим етапом проектування автоматизованої системи є вибір способу перетворення вхідних даних, які отримуються від давачів, в зображення. Отже постає завдання вибору способу програмного представлення (оцифрування) динамограми (струмограми). Для прикладу, надалі використовуватимемо динамограму, як більш поширену характеристику роботи ШНВУ. Обробка струмограм відбувається аналогічним чином. Є два шляхи вирішення задачі оцифрування: задання точок динамограми дійсними числами (у десятковій системі числення) або двійковими символами (у вигляді матриці одиниць і нулів). Проаналізувавши реальні та ідеалізовані динамограми і беручи до уваги, що кожному з видів динамограми відповідає певний стан обладнання свердловини, приходимо до висновку, що більш універсальним є використання



двійкової системи числення. До того ж, дані такого типу простіше обробляти за допомогою логічних операцій.

З цифрового давача зусилля  $P$  отримується масив даних за один повний оберт кривошипа. Якщо побудувати залежність цих даних від кута повороту кривошипа  $\alpha$ , то отримаємо розгорнену динамограму (рис.1.3). Отримані від давачів дані оцифровуються відповідно до прийнятих правил перетворення в бінарну форму. Для реалізації такого алгоритму використовується програмний пакет MATLAB 6.5 [42, 95], який дає змогу швидко проводити складні обчислення з матрицями та великою кількістю даних різного типу. Складена в середовищі MATLAB функція дає змогу зчитати дані давача, побудувати динамограму верстата у відносних одиницях та скласти матрицю в двійковій формі. Функція звертається до кожного елемента вхідного масиву, визначає приналежність елемента до однієї з клітинок вихідної матриці та присвоює цій клітинці "1". Всі інші елементи вихідної матриці, до яких функція не зверталася, залишаються рівними "0". Приклад накладання на зображення теоретичної динамограми координатної сітки [119] наведений на рис. 2.3.

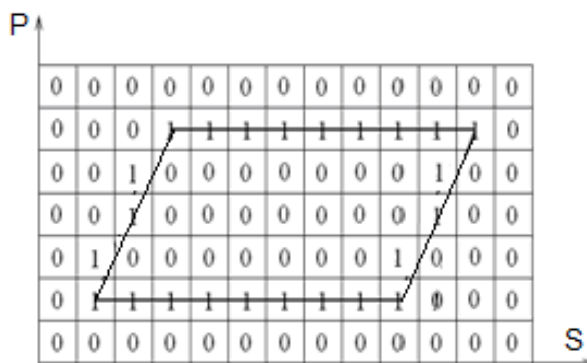


Рис. 2.3. Координатна сітка зображення теоретичної динамограми

Перетворені дані записуються як елементи матриці. Виділяючи характерні елементи зображення типових динамограм приймаємо, що ця матриця буде містити 20 рядків (експериментально встановлено, що збільшення кількості рядків не призводить до покращення результатів). Для спрощення обчислень та зменшення обсягу вхідних даних кількість стовпців вибираємо рівною 60.

Тобто значення зусилля на полірованому штоці буде фіксуватися з інтервалом у три градуси повороту кривошипа.

На основі даних, отриманих у результаті зазначеного перетворення графічного зображення, шляхом послідовного запису рядків "зліва направо – зверху вниз", формується бінарний код динамограми, що представляє собою вектор-рядок із 1200 елементів. При виведенні зображення динамограми на екран комп'ютера вихідний вектор-рядок перетворюється в матрицю необхідного розміру.

Для візуалізації роботи складена функція побудови таблиці, де елементи матриці, які рівні "1" виводяться у вигляді квадратиків, а елементи рівні "0" – у вигляді крапок. Результати роботи програми наведені на рис.2.4.

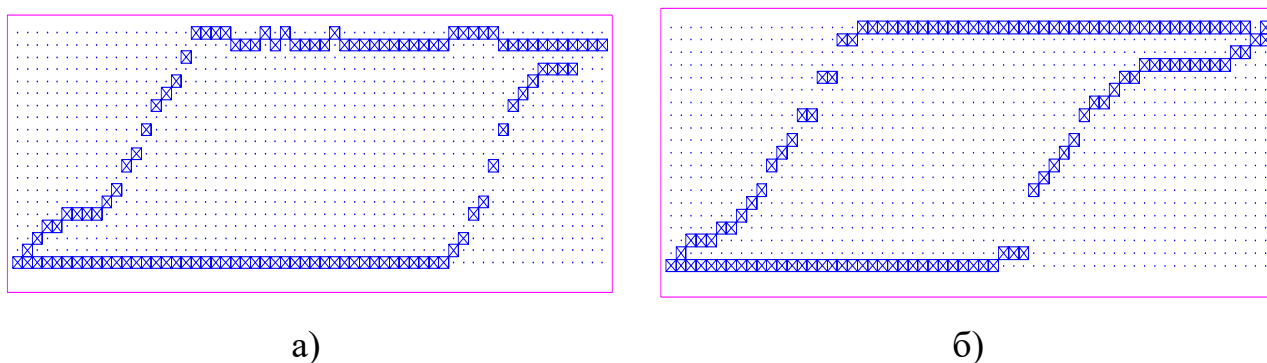


Рис. 2.4. Візуалізація матричного представлення типових динамограм знятих з ШНВУ при коефіцієнті заповнення помпи 0.95 (а) та 0.75(б).

Для отримання вхідних струмограм використаний той самий алгоритм. Тільки тут вхідною інформацією є масив значень струму, отриманий від давача струму живлення двигуна (рис. 2.5).

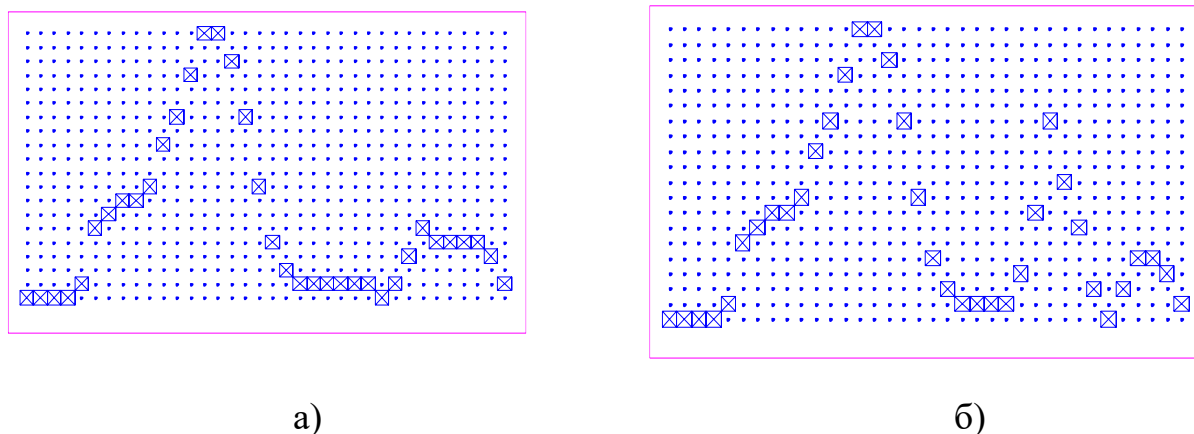


Рис. 2.5. Зразки матричного представлення типових струмограм при коефіцієнті заповнення помпи 0.95 (а) та 0.75(б).

Оскільки, крім динамограм, можуть використовуватися інші вхідні дані, то розроблений алгоритм потребує деяких удосконалень. Для цього, прийнято перетворювати всі вхідні дані у відносні одиниці в функції кута повороту кривошипа. Таке перетворення даних швидко виконується і не потребує значних обчислювальних ресурсів. Після перетворення вихідна матриця займає в пам'яті процесора декілька байт, що дає змогу створити базу даних з великою кількістю динамограм при обмежених ресурсах.

### 2.3. Проектування нейронної мережі прямого поширення

Існує широкий спектр досить універсальних програмних та апаратних інструментів для побудови та моделювання нейронних мереж [35, 46, 53, 66, 95, 101, 104, 129, 137]. Однак застосування нейромереж ускладнюється рядом причин. Не можна створити якусь одну універсальну мережу, яка б підійшла для різних типів завдань. Тому вибір конкретної нейромережі треба здійснювати виходячи з конкретної задачі, врахувавши вимоги та властивості необхідної системи керування.

Вузлом нейронної мережі є штучний нейрон, що є спрощеною схемою біологічного нейрона [104, 137, 154, 155]. Математично нейрон є ваговим

суматором, вихід якого  $y$  визначається через його входи і матрицю ваг таким чином:

$$y = f(u), \quad u = \sum_{i=1}^n w_i x_i + w_0 x_0, \quad (2.1)$$

де  $f(u)$  – передавальна функція нейрона;

$x_i$  і  $w_i$  – відповідно сигнали на входах нейрона і ваги входів.

Функція  $u$  називається індукованим локальним полем. Можливі значення сигналів на входах нейрона задають в інтервалі  $(0,1)$ . Вони можуть бути або дискретними (0 чи 1), або аналоговими. Додатковий вхід  $x_0$  і відповідна йому вага використовується для ініціалізації нейрона [104, 137, 155]. Під ініціалізацією мається на увазі зсув активаційної функції нейрона по горизонтальній осі, тобто формування порогу чутливості нейрона. Крім того, іноді до виходу нейрона спеціально додають якусь випадкову величину, яка називається зсувом.

Один нейрон здатний виконувати найпростіші процедури розпізнавання. Однак складніші обчислення потребують з'єднань нейронів у мережу [101, 104, 137, 155, 168]. Найпростіша мережа складається з групи нейронів, що створюють шар, як показано на рис.2.6а. Така мережа називається одношаровою. За потреби обчислювати складніші задачі нейронну мережу ускладнюють додатковими шарами (рис.2.6б).

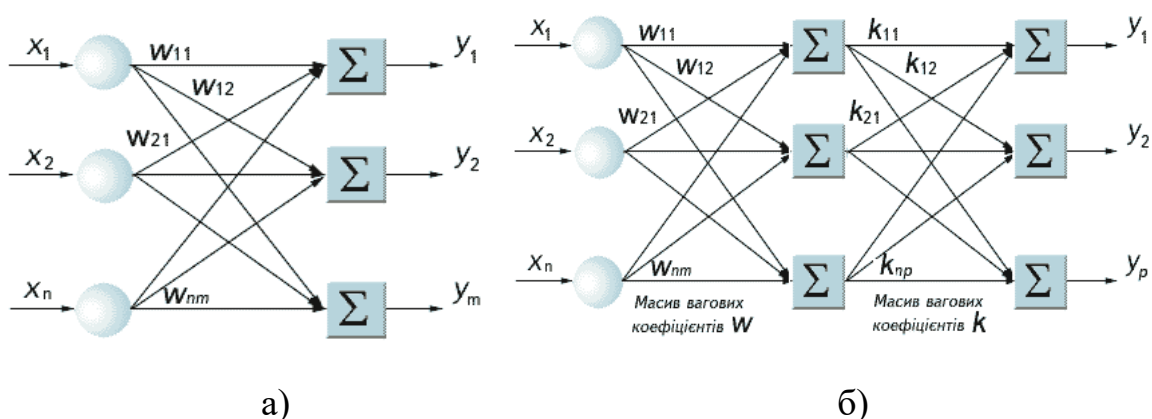


Рис. 2.6. Одношарова (а) та двошарова (б) нейронна мережа.

Вихід одного шару є входом для наступного. Обчислення виходу шару полягає в множенні вхідного вектора на першу вагову матрицю з подальшим множенням результуючого вектора на другу вагову матрицю.

В системах автоматизації найчастіше використовують багатошаровий перцептрон [104, 137], що належить до класу мереж прямого поширення. Він має кілька шарів нейронів: вхідний, один або кілька прихованих шарів, і вихідний шар. Ці мережі є статичними в тому сенсі, що для заданого вхідного сигналу вони виробляють одну сукупність вихідних значень, які не залежать від попередніх станів мережі. Навчання багатошарового перцептрона відбувається методом зворотного поширення похибки.

Задача розпізнавання образів багатошаровим перцептроном зводиться до визначення приналежності об'єкта до якого-небудь класу. Точність розпізнавання в основному залежить від налаштування вихідних реакцій перцептрона, вибору його передавальної функції (функції активації) та ефективності алгоритму навчання.

Одним з найбільш поширених типів передавальних функцій є сигмоїдальна [104, 137, 165]

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} - 1. \quad (2.2)$$

Нами вибрано сигмоїдальну функцію завдяки її властивостям:

- здатність підсилювати "слабкі" сигнали сильніше, ніж "великі", що зменшує ймовірність "насичення";
- монотонність і диференційованість на всій осі абсцис;
- простий вираз похідної

$$f'(x) = \frac{e^{-x}}{(1 + e^{-x})^2}, \quad (2.3)$$

що дає можливість використовувати її для широкого спектру оптимізаційних алгоритмів.

У нашому випадку перший шар нейронної мережі містить активаційну сигмоїдальну функцію спеціального вигляду (рис.2.7).

$$f(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1. \quad (2.4)$$

Така форма вибрана для кращого розподілу вхідних даних по класах. Вихідний вектор такої функції може змінюватися в межах  $(-1;1)$ .

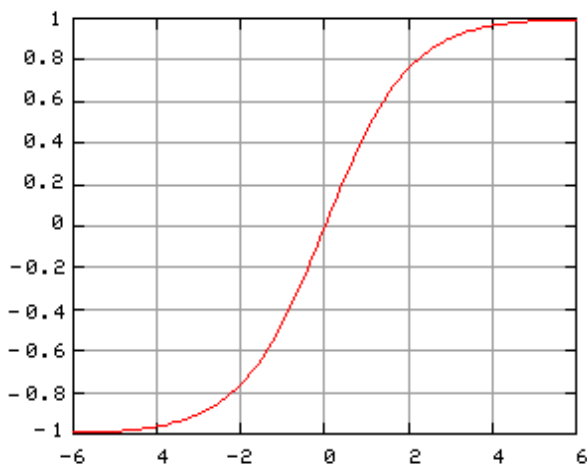


Рис.2.7. Сигмоїдальна активаційна функція першого шару мережі з виходом в межах  $(-1;1)$ .

В зовнішньому шарі мережі для спрощення обчислень і підвищення швидкодії використано лінійну функцію  $f(x) = x$ .

Для коректної роботи такої мережі потрібно провести її навчання. Розрізняють алгоритми навчання з вчителем і без вчителя [100, 132, 155, 167]. Навчання з вчителем передбачає, що для кожного вхідного вектора існує цільовий вектор, який є бажаним виходом. Разом їх називають навчальною парою. Переважно мережа навчається на деякому числі таких навчальних пар. Для кожної такої пари обчислюється похибка, яку за допомогою зворотного зв'язку мінімізують відповідно до алгоритму. Навчання відбувається доти, поки похибка по всьому навчальному масиву не досягне заданого низького рівня.

В нашому випадку алгоритм навчання базується на правилах Хебба [137]. Це є модель навчання без вчителя, в якій синаптична вага (зв'язок) зростає, якщо в процесі навчання активуються обидва нейрони – джерело і приймач. У

штучній нейронній мережі, що використовує навчання за Хеббом, нарощування ваги визначається виробленням рівнів збудження передаючого і приймаючого нейронів, що можна виразити формулою

$$w_{ij}(n+1) = w(n) + a \cdot OUT_i \cdot OUT_j, \quad (2.5)$$

де  $w_{ij}(n)$  – значення ваги від нейрона  $i$  до нейрона  $j$  перед налаштуванням,  
 $w_{ij}(n+1)$  – значення ваги від нейрона  $i$  до нейрона  $j$  після налаштування,  
 $a$  – коефіцієнт швидкості навчання,  
 $OUT_i$  – вихід нейрона  $i$  та вхід нейрона  $j$ ,  
 $OUT_j$  – вихід нейрона  $j$ .

Для навчання мережі в програмному середовищі MATLAB NEURAL NETWORK вибрано типову функцію *trainidx*. Ця функція налаштовує значення ваг та зміщень нейронів за методом градієнтного спуску із застосуванням адаптивного навчання. Для цього використовується алгоритм зустрічного поширення похибки. Структура нейромережі зустрічного розповсюдження показана на рис.2.8 [34]. В алгоритмі зустрічного поширення похибки об'єднані дві

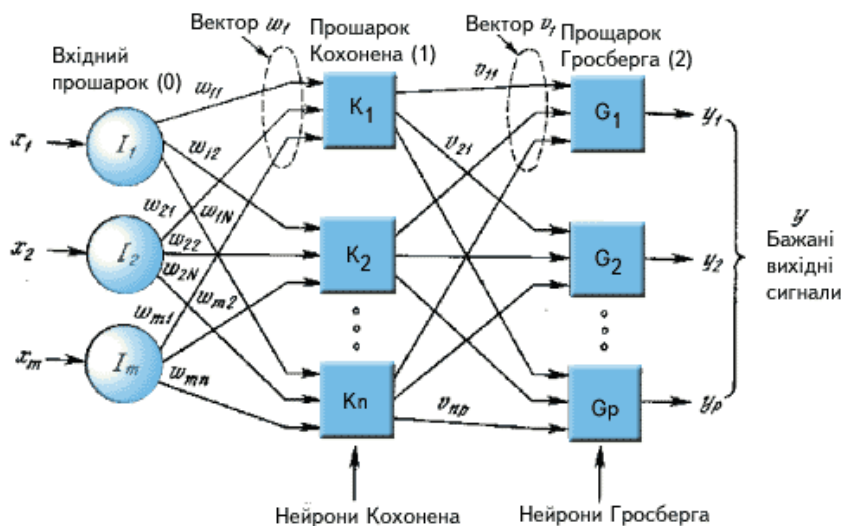


Рис. 2.8. Нейронна мережа зустрічного поширення без зворотних зв'язків

добре відомі різнотипні структури: карта Кохонена і зірка Гроссберга [137, 159]. У простій формі шар Кохонена функціонує за принципом “переможець забирає все”, тобто для даного вхідного вектора лише один нейрон Кохонена видає на виході логічну одиницю, всі інші видають нуль. "Переможцем" є нейрон з максимальним значенням вихідного сигналу.

$$NET_j = \max \left( \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \right) \quad (2.6)$$

Шар Гроссберга формує вихідний вектор після розбиття шаром Кохонена вхідних векторів на класи. Виходом шару Гроссберга є вектор ваг нейронів, які зв'язані з нейроном "переможцем" Кохонена:

$$OUT_j = \sum_{i=1}^p v_{ij} NET_j \quad (2.7)$$

Основною перевагою нейронної мережі, яка використовує алгоритм зустрічного поширення похибки, є порівняно малий час навчання (приблизно в 100 разів менший, ніж для зворотного розповсюдження похибки). Коли мережа навчена, обробка вхідного вектора зводиться до отримання необхідного вихідного вектора. Позитивною стороною даної мережі є здатність одержувати правильний вихідний вектор навіть за наявності похибок у вхідному векторі. Це дає змогу використовувати дану мережу для систем з сильно зашумленими вхідними сигналами.

На рис. 2.9 показано результати проведеного нами навчання мережі в середовищі MATLAB NEURAL NETWORK.

З наведених графіків видно, що вибраний алгоритм навчання ефективно вирішує завдання налаштування вагових коефіцієнтів. Навчання припинилося, коли функція мети (значення похибки) досягла значення “GOAL”. Це свідчить, що мережа навчилася правильно.

Для дослідження ефективності роботи вибраної мережі було проведено ряд експериментів. Входом мережі була динамограма, яка отримана експериментально. Завданням мережі був розрахунок коефіцієнта приналежності вхідної динамограми до одної з типових, які мають різні



коефіцієнти заповнення. Для візуалізації роботи мережі використано розроблену програму, яка виводить на екран комп'ютера результати розпізнавання.

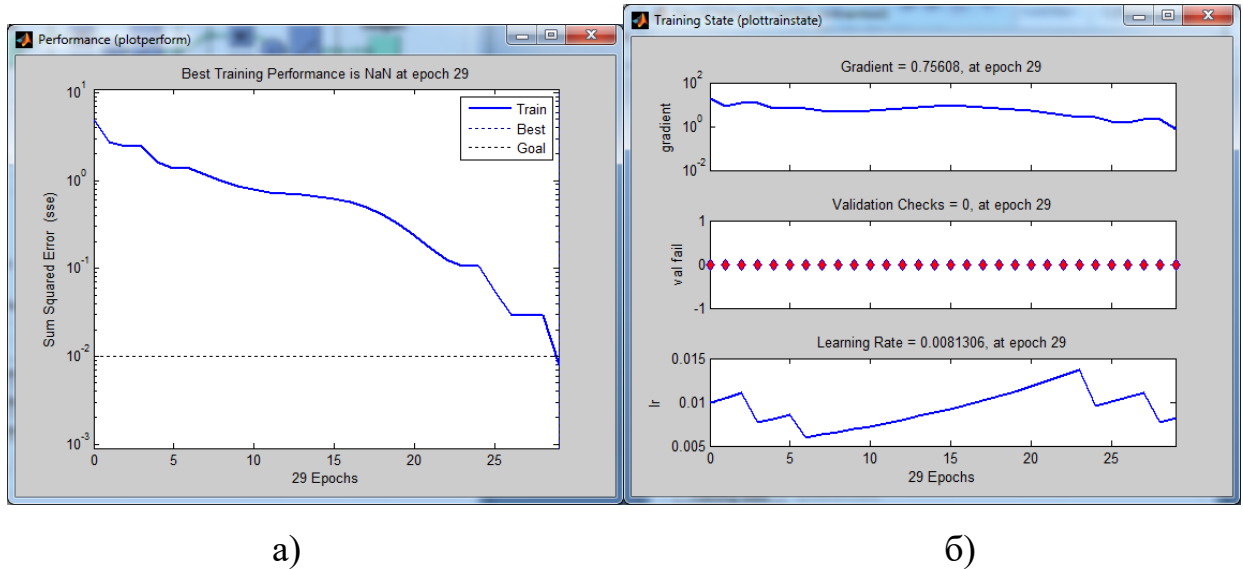


Рис. 2.9. Зміна величини похибки (а) та змінні, що визначають похибку (б) під час навчання нейронної мережі.

На рис. 2.10 показана оцифрована зашумлена динамограма, яка подається на вхід нейронної мережі. В результаті роботи мережі отримуємо гістограму (рис.2.11), де показано рівень приналежності вхідного зображення до типових. На рис.2.12 виведено типову динамограму, яка відповідає вхідній.

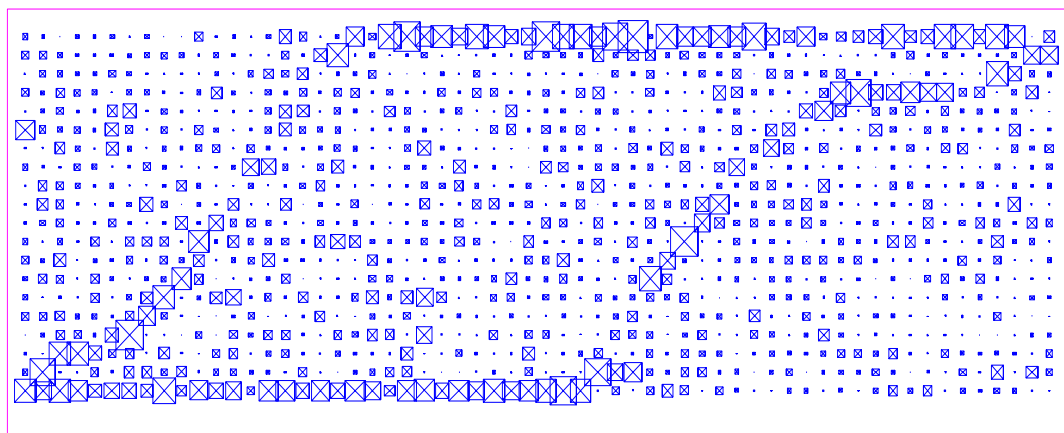


Рис. 2.10. Динамограма, що подається на вхід нейронної мережі.

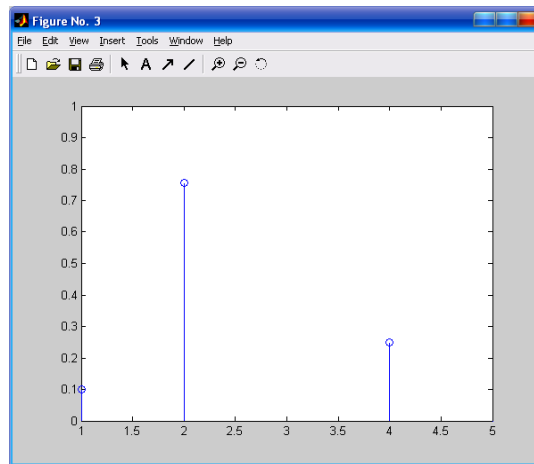


Рис. 2.11. Гістограма приналежності результату розпізнавання вхідної динамограми.

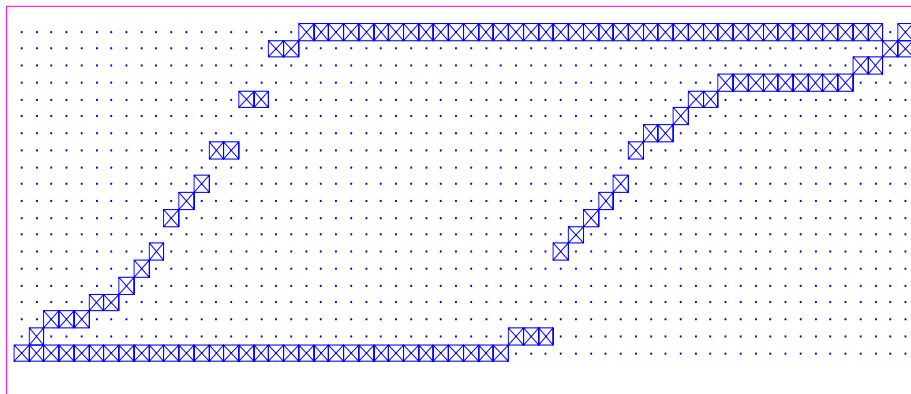
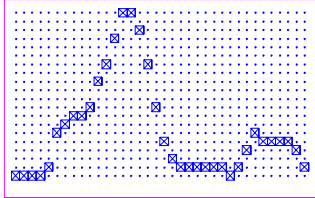
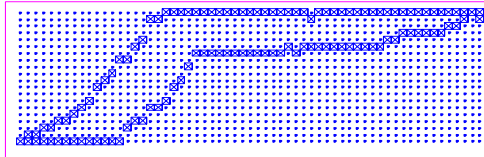
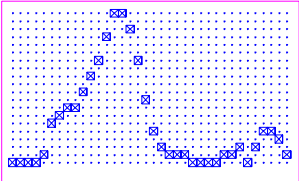
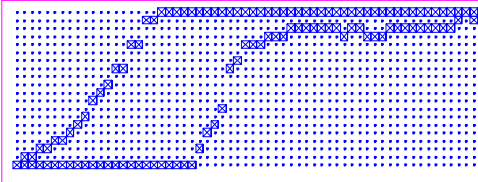
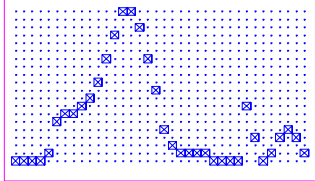
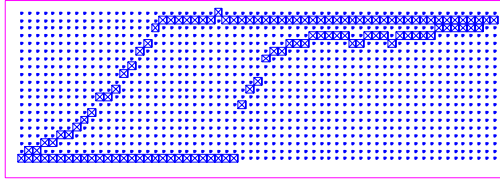
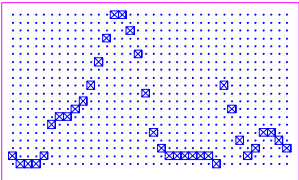
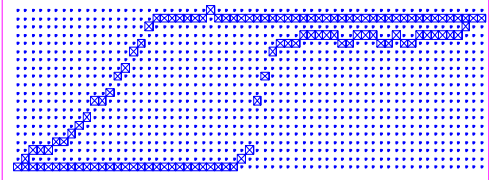
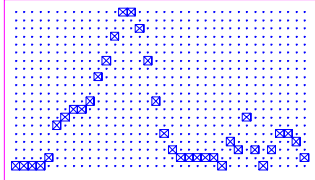
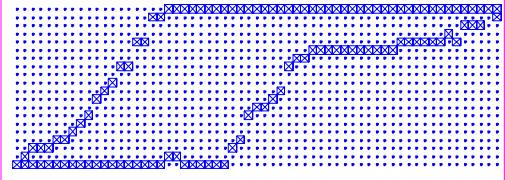
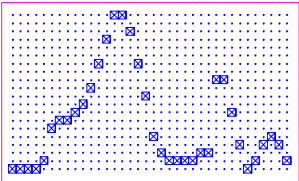
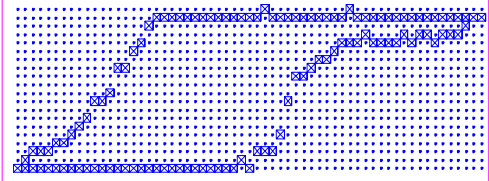


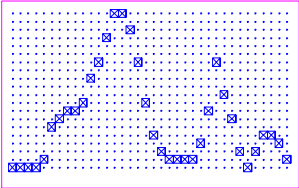
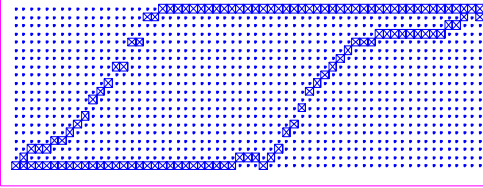
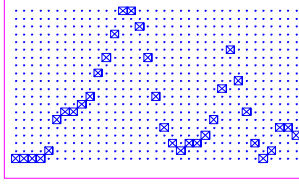
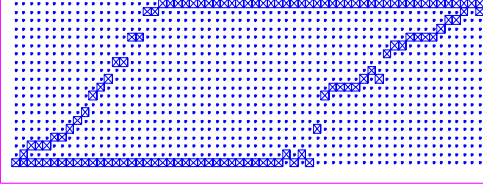
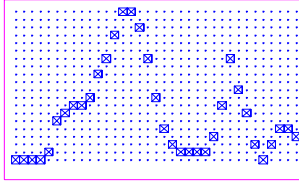
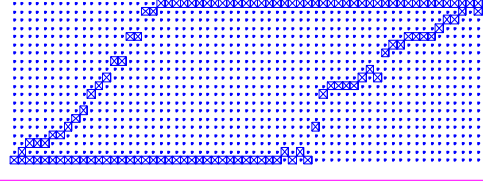
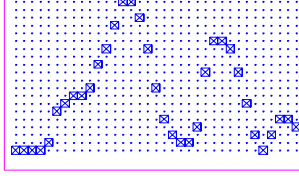
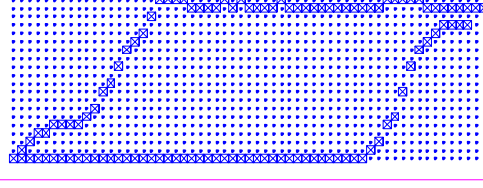
Рис. 2.12. Типова динамограма з бази даних нейронної мережі.

З рисунка 2.11 видно, що найбільше значення коефіцієнта приналежності має динамограма, яка є в базі даних за номером 2. Оскільки ми подавали на вхід мережі другий тип динамограми, то можна вважати, що мережа добре справилася з завданням розпізнавання. Для більш глибокої перевірки працездатності нейромережі проведено ряд досліджень з низкою знятих в реальних умовах роботи нафтовидобувної установки НГВУ "Бориславнафтогаз" динамограм та струмограм.

Навчання мережі відбувалося на вибірці зображень, для яких коефіцієнт заповнення ( $k_3$ ) змінюється з кроком 0,05 (таблиця 2.1). Такий крок дає можливість з достатньою точністю плавно регулювати продуктивність помпи.

Таблиця 2.1

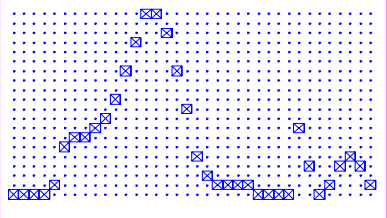
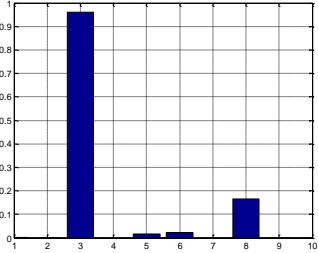
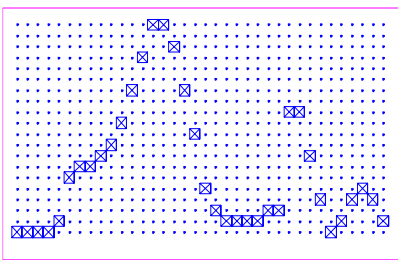
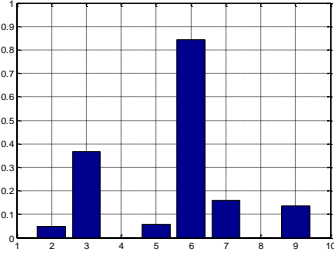
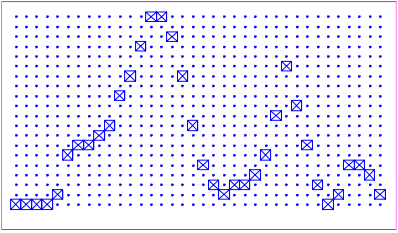
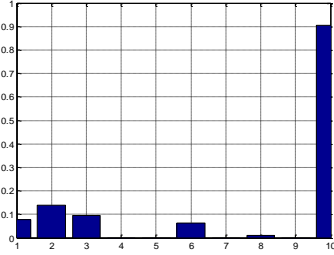
| Струмограма   | Динамограма  | Коефіцієнт заповнення |
|---|--|-----------------------|
| 1   | 2  | 3                     |
|    |    | 0,5                   |
|    |    | 0,55                  |
|   |   | 0,6                   |
|  |  | 0,65                  |
|  |  | 0,7                   |
|  |  | 0,75                  |

| 1   | 2  | 3    |
|---|--|------|
|    |    | 0,8  |
|    |    | 0,85 |
|   |   | 0,9  |
|  |  | 1    |

В таблиці 2.2 наведено ілюстрацію результатів роботи нейронної мережі, на вхід якої подано струмові графіки, що не входили до навчальної вибірки.

У результаті проведених досліджень виявлено, що нейромережа прямого поширення добре справляється з завданням, де її вихід не залежить від історії входів (немає динаміки в часі). Для роботи з динамічними процесами такий тип мережі потребує великої навчальної вибірки, що суттєво звужує область її застосування.

Таблиця 2.2

| Вхідний масив<br>(з деяким рівнем шуму)   | Гістограма   | Вихідний масив<br>ймовірностей   |
|---|--|--|
|    |    | 0.0020<br>0.0084<br>0.9613 – відповідає $k_3 = 0,6$<br>0.0025<br>0.0151<br>0.0215<br>0.0527<br>0.1666<br>0.0034<br>0.0061  |
|   |   | 0.0672<br>0.0496<br>0.3669<br>0.0665<br>0.0567<br>0.8428 – відповідає $k_3 = 0,75$<br>0.1585<br>0.0271<br>0.1366<br>0.1091 |
|  |  | 0.0780<br>0.1394<br>0.0963<br>0.1710<br>0.2067<br>0.0622<br>0.0872<br>0.0112<br>0.1115<br>0.9055 – відповідає $k_3 = 1,0$  |

## 2.4. Проектування рекурентної нейронної мережі

Для оброблення більш складних вхідних сигналів використовують рекурентні мережі [137]. Відмінність цих мереж в порівнянні з мережами прямої дії є наявність зв'язку вихідного сигналу з вхідним. Вони є

динамічними, оскільки містять зворотні зв'язки, що модифікують нейрони та призводить до зміни стану мережі. Такий тип мереж використовують для роботи з динамічними процесами. Для навчання використовують той самий алгоритм зворотного поширення похибки, але з врахуванням рекурентного зв'язку.

У нашому випадку більш доцільно для розпізнавання зображень вибрати нейронні мережі, які відносять до класу класифікаторів. Більшість з них мають архітектуру описану Хопфілдом (рис. 2.13) [137, 154]. Вона складається тільки з одного шару нейронів, число яких є одночасно числом входів і виходів мережі. Кожен нейрон зв'язаний синапсами зі всіма іншими нейронами, а також має один вхідний синапс, через який надходить вхідна інформація.

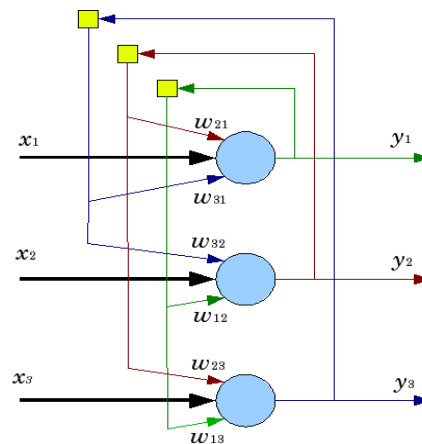


Рис. 2.13. Нейронна мережа Хопфілда з трьома входами

Цій мережі для навчання потрібно деякий набір двійкових векторів, які вважаються еталонними. Мережа повинна вміти з довільного неідеального сигналу, поданого на її вхід, виділити відповідний зразок (якщо такий є) або в іншому випадку видати найбільш схожий образ.

У загальному випадку, будь-який вхідний сигнал можна описати вектором:

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}, \quad (2.9)$$

де  $n$  – число нейронів в мережі.

Коли мережа розпізнає один з вхідних векторів (зразків), то на виході мережі буде вектор  $Y$ , який співпадає з вхідним  $X$ .

$$Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}. \quad (2.10)$$

На стадії навчання мережі вагові коефіцієнти синапсів встановлюються згідно з виразом:

$$W_{ij} = \begin{cases} \sum_{k=1}^m x_i^k x_j^k, & i \neq j, \\ 0, & i = j \end{cases} \quad (2.11)$$

де

$i$  та  $j$  – індекси, відповідно, вхідного та вихідного синапсів нейронів;

$x_i^k, x_j^k$  –  $i$ -ий та  $j$ -ий елементи вектора  $k$ -ого зразка;

$m$  – кількість зразків.

Мережа працює наступним чином.

На її входи подається невідомий сигнал

$$y_i(t_0) = x_i, \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (2.12)$$

де  $t_0$  – нульова ітерація в циклі роботи мережі.

Згідно з наступними виразами розраховуються новий стан нейронів

$$s_j(t+1) = \sum_{i=1}^n w_{ij} y_i(t), \quad j = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (2.13)$$

та нові значення аксонів

$$y_j(t+1) = f(s_j(t+1)), \quad (2.14)$$

де  $f$  – активаційна функція.

Далі перевіряється чи змінилися вихідні значення аксонів за останню ітерацію. Якщо так, то за формулами (2.13–2.14) розраховуються нові стани нейронів і аксонів, в іншому випадку (виходи стабілізувалися) обчислення припиняються. У результаті отриманий вихідний вектор є еталонним зразком, який найкращим чином відповідає вхідному вектору.

Таким чином, коли подається новий вектор, мережа переходить з одного стану в інший, поки не стабілізується. Стабільний стан є одним з локальних мінімумів (вершиною), який визначається вагами нейронів і поточними входами. Якщо вхідний вектор частково неправильний або неповний, мережа

стабілізується у вершині, найближчій до бажаної. В [142] доведено, що достатньою умовою стійкої роботи такої мережі є виконання умови

$$w_{ij} = w_{ji}, w_{ii} = 0. \quad (2.15)$$

Для дослідження динаміки мереж Хопфілда нами використано нейродинамічну модель, яка базується на адитивній моделі нейрона [137]. Згідно з такою моделлю нейронна мережа з  $N$  нейронів описується рівнянням:

$$C_j \frac{d}{dt} v_j(t) = -\frac{v_j(t)}{R_j} + \sum_{i=1}^N w_{ij} x_i(t) + I_j, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (2.16)$$

де

$C_j$  – коефіцієнти зв'язків між нейронами (матриця кореляції);

$f_j$  – активаційна функція кожного нейрона;

$I_j$  – зовнішнє зміщення для кожного нейрона;

$w_{ij}$  – матриця синаптичних ваг.

В (2.16) зроблені такі припущення [104, 137, 154]:

1. Матриця синаптичних ваг є симетричною.
2. Кожен нейрон має власну нелінійну функцію активації.
3. Для всіх нелінійних функцій активації існують зворотні, тобто

$$v = f_i^{-1}(x) \quad (2.17)$$

Функцію активації нами вибрано сигмоїдальною (2.4). В [137, 154] показано, що функція енергії (Ляпунова) мережі Хопфілда є монотонно спадною функцією часу. На рис.2.14 наведена контурна карта енергії неперервної моделі Хопфілда, що складається з двох нейронів. Виходи цих двох нейронів є ординатами і абсцисами. Стійкі стани розташовані біля нижнього лівого і верхнього правого кутів. Нестійкі екстремуми розташовані в інших двох кутах. Стрілки показують переміщення.



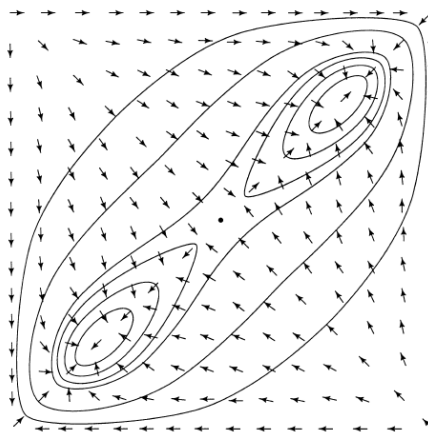


Рис.2.14. Контурна карта енергії системи з двома стійкими станами.

Для чіткого розуміння роботи нейронної мережі Хопфілда графічно показано принцип роботи мережі при простих вхідних даних. Вхідними даними є двовимірний масив випадкових значень. Це дає змогу зробити проєкцію режиму навчання та роботи мережі на площину (рис.2.15).

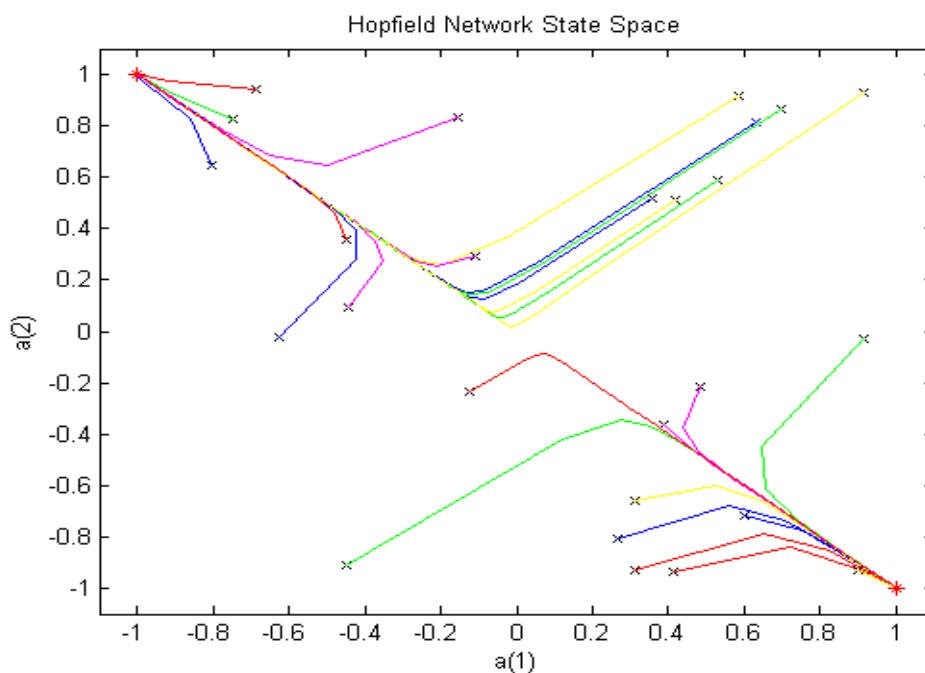


Рис. 2.15. Графічне відображення роботи мережі Хопфілда.

З рисунка видно, що існує дві точки з координатами  $(-1, 1)$  та  $(1, -1)$ , належність до яких визначає нейронна мережа. Хоча вхідний масив складений з випадкових значень, мережа чітко визначає правильний результат за декілька (3–5) ітерацій. Для складніших випадків, де є велика кількість збіжних точок і

їх розмірність значно перевищує 2, нейронній мережі потрібна більша навчальна вибірка і виведення правильного результату потребує більше ітерацій.

У даному випадку нейромережа повинна вміти розпізнати графік струму привідного двигуна верстата-гойдалки або графік динамограми. Навчання мережі відбувалося на вибірці струмових графіків, які були зняті з різним коефіцієнтом заповнення глибинної помпи, що змінювався з кроком 0,05 (рис. 2.16а). Такий крок дає можливість з достатньою точністю плавно регулювати продуктивність помпи.

Дослідження мережі на вибірці струмограм для тестування (рис. 2.16б) показали, що правильний результат отримується після 15 ітерацій.

Приклад результатів тестування показаний на рис. 2.17.

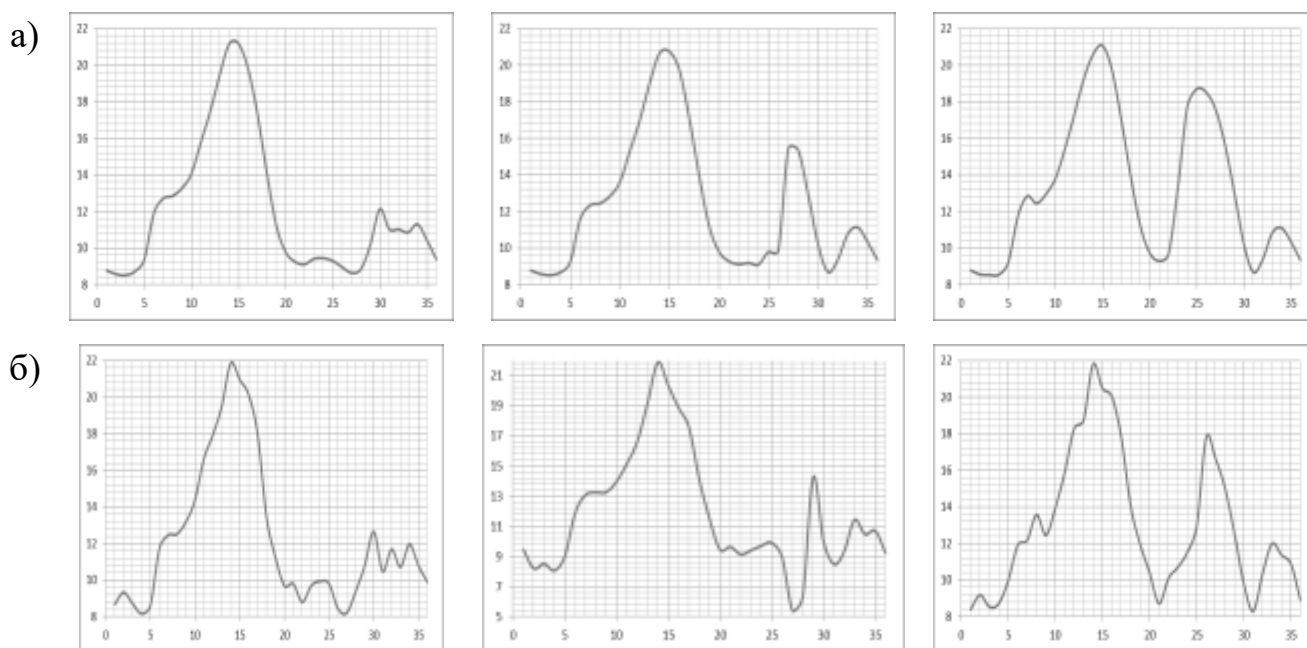
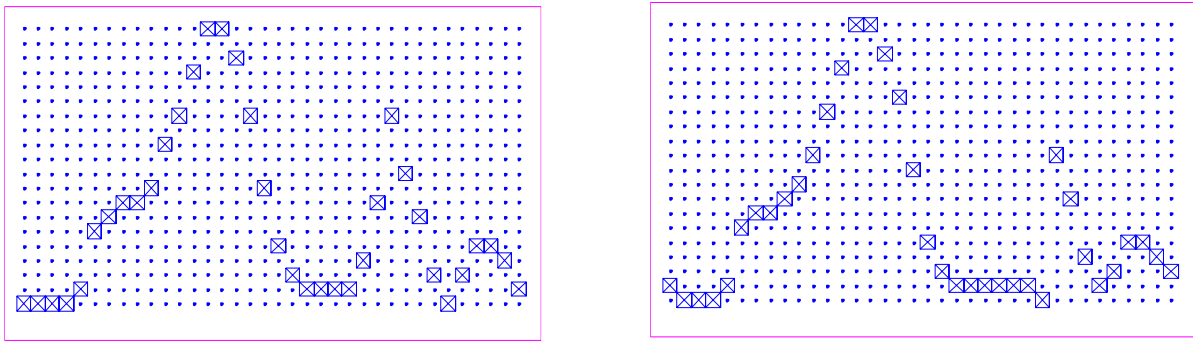


Рис. 2.16. Зразки елементів вибірки для навчання (а) та тестової вибірки (б)



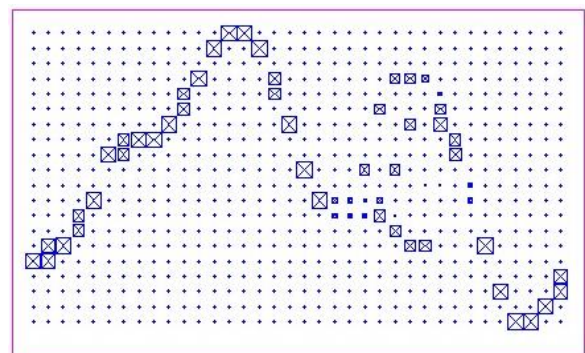
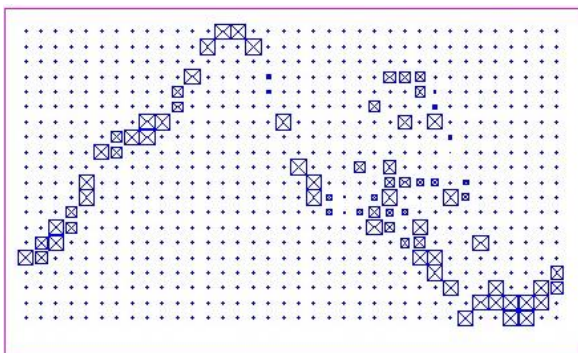
а)

б)

Рис. 2.17. Результат розпізнавання струмограми мережею Хопфілда, де (а) – вхідне зображення, а (б) – вихідне.

З проведених досліджень можна зробити висновок, що мережі цього типу добре справляються з задачами, де потрібно визначити подібність вектора до одного з типових, який мережа запам'ятала під час навчання. Недоліком мережі Хопфілда є досить вузьке коло застосування через необхідність задавати вхідний вектор двійковими елементами та неможливість визначати проміжні значення, а також обмеження за кількістю класів зображень для запам'ятовування.

З рис. 2.18, де показано проміжні значення вихідного зображення, чітко видно, що на перших ітераціях зображення містить частини всіх даних з навчальної вибірки, але далі вибираються тільки ті, які найбільш подібні.



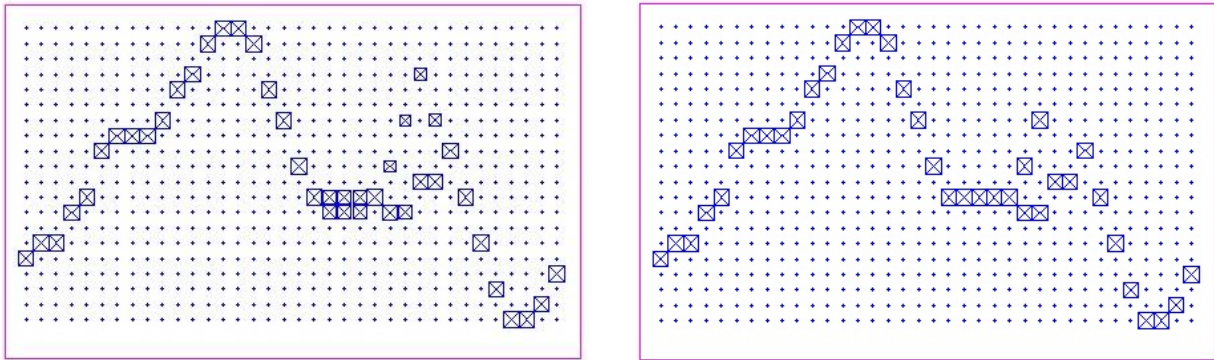


Рис. 2.18. Результуюче зображення на проміжних ітераціях

Під час роботи мережі Хопфілда ознакою закінчення розпізнавання є момент, коли досягається статичний стан (на кожному наступному кроці повторюється стійкий стан) або, динамічний (при чергуванні двох різних станів). Цей кінцевий стан мережі і є її реакцією на вхідний образ. Правильним результатом є такий стійкий стан, який збігається з одним з запам'ятованих під час навчання векторів. Однак за деяких умов (зокрема, при занадто великій кількості вхідних навчальних образів) результатом роботи може стати, так званий, помилковий мінімум, що складається з декількох частин різних образів. Така ситуація є помилковою і її слід уникати.

Цей недолік частково усунутий в двошаровій модифікації мережі Хопфілда – нейронній мережі Хемінга (рис.2.19) [34, 104].

Запропонована нейронна мережа має два шари. Перший і другий шари мають по 10 нейронів, що відповідає кількості класів з вибраними еталонними зображеннями. Оскільки вхідне зображення динамограми або струмограми є матрицею  $20 \times 60$ , то нейрони першого шару мають по 1200 синапсів (входів).

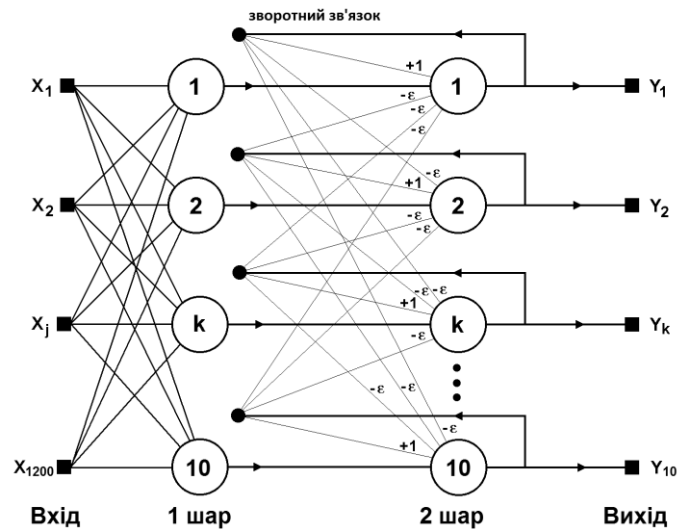


Рис. 2.19. Структура нейронної мережі Хемінга.

Перший шар – шар Хемінга, є нейронною мережею прямого поширення. Цей шар розраховує ступінь подібності (відстань Хемінга) вхідного вектора до еталонних. Відстань Хемінга – це кількість елементів в вхідному зображенні, які відрізняються від еталонного. В цьому шарі використана лінійна функція активації. Другий шар – шар Хопфілда має 10 нейронів із зворотними зв'язками. Всі зворотні зв'язки є від'ємними. Для кожного нейрона є один додатний зв'язок, що з'єднує вхід і вихід нейрона. Зв'язки побудовані за принципом “кожний з кожним”. Тип активаційної функції – порогова (*sign*).

Принцип роботи вибраної мережі ґрунтується на знаходженні коефіцієнта приналежності вхідного двійкового вектора до еталонного (еталонні вектори мережа запам'ятовує в процесі навчання). Тобто, мережа є класифікатором, що на виході дає тільки номер класу, до якого належить вхідне зображення. Даний тип мереж використовують у випадку, коли немає необхідності, щоб мережа після розпізнавання видавала розпізнаний зразок, а достатньо тільки його номер.

Згідно з алгоритмом роботи цієї мережі на її входи подається невідомий бінарний вектор, на основі якого розраховуються вагові коефіцієнти першого шару. Далі перетворені значення подаються на другий шар. Якщо виходи другого шару збігаються з його входами, то алгоритм завершується, якщо ні, то

повертається знову до входів другого шару. З алгоритму роботи такої мережі видно, що її перший шар використовується тільки на початку і відіграє роль фільтра та архіватора. Завдяки йому прискорюється робота мережі і витрачаються менші обчислювальні ресурси та пам'ять.

На рис.2.20 показано алгоритм роботи системи розпізнавання образів на базі нейромережі Хемінга.

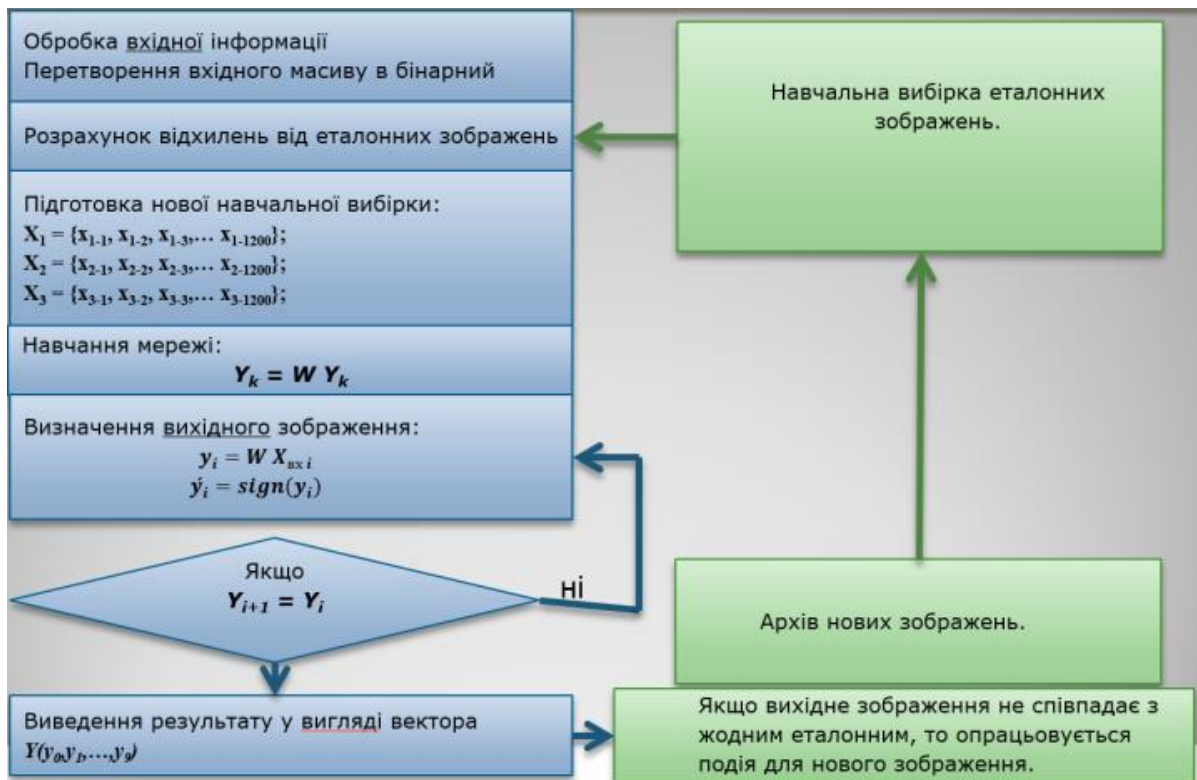


Рис. 2.20. Алгоритм роботи системи розпізнавання образів.

На першому етапі знаходиться відстань Хемінга – кількість елементів вхідного зображення, які відрізняються від еталонного. Графічна інтерпретація такого розрахунку наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3

#### Відстань Хемінга

|  |                      |
|--|----------------------|
|  | Відстань Хемінга = 0 |
|  | Відстань Хемінга = 2 |
|  | Відстань Хемінга = 5 |

В класичному випадку розрахунком відстаней Хемінга займається перший шар нейронної мережі, яка є мережею прямого поширення. Такий підхід потребує значних обчислювальних ресурсів. Оскільки навчальна вибірка досить велика і в процесі роботи нафтовидобувної установки вона буде збільшуватися, то цей шар потребуватиме постійних модифікацій та збільшення кількості нейронів. Це тягне за собою ускладнення алгоритму функцією адаптації і, як наслідок, збільшення похибок та зниження ймовірності правильного розпізнавання стану свердловини.

Тому нами прийнято рішення замінити перший шар нейронної мережі Хемінга на алгоритм побітового порівняння масивів. В його основі закладений швидкий пошук елементів по базі даних, що дає змогу за декілька ітерацій видати результат. Таке рішення значно спрощує програмну частину системи керування.

Перед початком розпізнавання нейромережею якогось вхідного сигналу необхідно підготувати навчальну вибірку. Нами прийнято, що навчальна вибірка буде містити 10 зображень, які відповідають значенням коефіцієнта заповнення помпи від 0,5 до 1 з кроком 0,05. Після порівняння вхідного вектора зі всіма еталонними отримуємо вектор з 10-ма елементами.

З цих десяти значень вибираємо три з найменшими відстанями Хемінга та вибираємо три еталонних зображення, які відповідають цим відібраним векторам. Це і буде навчальна вибірка для наступного шару мережі (мережа Хопфілда).

$$\begin{aligned} X_1 &= \{x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, \dots, x_{1\ 1200}\}; \\ X_2 &= \{x_{21}, x_{22}, x_{23}, x_{24}, \dots, x_{2\ 1200}\}; \\ X_3 &= \{x_{31}, x_{32}, x_{33}, x_{34}, \dots, x_{3\ 1200}\}. \end{aligned} \tag{2.18}$$

В другому шарі, згідно з правилами навчання мережі Хопфілда, перемножуємо навчальний вектор на цей же транспонований. Таким чином, отримуємо три квадратні матриці (2.19). Ці матриці додаються, а діагональ

результуючої матриці  $\mathbf{W}$  замінюється нулями для більшої стійкості мережі  $\mathbf{W}_{ij} = 0$ , для  $i=j$  [104, 137].

$$\begin{aligned}\mathbf{W}_1 &= \mathbf{X}_1 \times \mathbf{X}_1^T; \\ \mathbf{W}_2 &= \mathbf{X}_2 \times \mathbf{X}_2^T; \\ \mathbf{W}_3 &= \mathbf{X}_3 \times \mathbf{X}_3^T; \\ \mathbf{W} &= \mathbf{W}_1 + \mathbf{W}_2 + \mathbf{W}_3.\end{aligned}\tag{2.19}$$

Результуюча матриця  $\mathbf{W}$  (рис.2.20) множиться на транспонований вектор вхідного зображення  $X_i$  ( $i = 1,2,3$ ). У результаті отримаємо вектор  $\dot{y}$ , який обробляємо за допомогою функції активації *sign*. Ця функція замінює кожний елемент вектора на 1 або  $-1$  згідно з правилами (якщо  $x_i < 0$ , то  $x_i = -1$ , якщо ні, то  $x_i = 1$ ). Отриманий вектор  $Y_{i+1}$  порівнюємо з вектором з попередньої ітерації  $Y_i$  (якщо ітерація перша, то порівнюємо з вхідним вектором). Якщо вектори відрізняються, то повертаємося на попередній крок, вибравши інший вектор  $X_i$ . Інакше, порівнюємо отриманий вектор з еталонними і вибираємо відповідний. Якщо немає жодного відповідного вектора, то створюється новий зразок, який за допомогою оператора можна додати в базу існуючих еталонів.

Запропонована мережа працює просто і швидко. У моделі використаний один з найпростіших алгоритмів формування синаптичних ваг і зміщень мережі тому система завжди збіжна. На відміну від мережі Хопфілда, ємність мережі Хемінга не залежить від розмірності вхідного сигналу, а тільки від кількості еталонних зображень. Перевагою мережі Хемінга вважається невелика кількість зважених зв'язків між нейронами. Численні експерименти довели, що мережа Хемінга дає кращі результати, ніж мережа Хопфілда. Основним її недоліком є те, що мережа може працювати тільки з бінарними даними. Крім того, якщо вхідний вектор сильно зашумлений (відстань Хемінга перевищує 60% від загальної кількості елементів), то відсоток розпізнавання значно зменшується і збільшується кількість хибних спрацювань.

Запропонована модифікація нейромережі Хемінга дає змогу ідентифікувати вхідну залежність (струмограму чи динамограму) з достатньою точністю. В системі керування на основі такої мережі зменшується кількість



елементів та функціональних вузлів, і як наслідок – збільшується її надійність. Відсутнє багатократне перетворення даних, тому зменшилася похибка. Система керування не потребує значних обчислювальних ресурсів (виконуються прості арифметичні операції), тому достатньо недорогого мікроконтролера для її реалізації.

## **2.5. Використання бази даних в складі системи розпізнавання образів**

Процес обробки зображень і їх розпізнавання пов'язаний з великою кількістю даних, яку потрібно десь зберігати. Найпростіше з точки зору програмування дані про структуру мережі та її характеристики можна зберігати в спеціалізованих файлах, структура яких може бути підібрана відповідним чином. Однак, у цьому разі постає проблема одночасного доступу до даної інформації кількох користувачів, які знаходяться в різних місцях. Це означає, що, створена на базі вже навченої мережі, система розпізнавання для однієї установки, може бути використаною й для інших установок, що виконують аналогічні операції. З другого боку, мати центральну нейронну мережу, яка використовується для керування всіма об'єктами одночасно є недоцільно, так як нафтовидобувна установка повинна мати можливість швидкого перепрограмування і перенавчання з появою нових зображень. Таким чином, кожна установка повинна бути обладнана своєю системою розпізнавання. Проте дані кожної мережі не обов'язково зберігати в кожній системі керування окремо. Отже, слід організувати загальне сховище даних, в якій зберігалася б інформація для навчання та роботи нейронних мереж. На теперішній час виходом в подібній ситуації є зберігання інформації в спеціалізованій базі даних (БД). Ці бази даних керуються спеціальними програмними комплексами – системами управління базами даних (СУБД).

Збільшення обсягу та структурної складності збережених даних, розширення кола користувачів інформаційних систем призвели до широкого поширення найбільш зручних і порівняно простих для розуміння реляційних

(табличних) СУБД. Вони забезпечують одночасний доступ до даних безлічі користувачів, які розташовані далеко як один від одного, так і БД.

Реляційні бази даних складаються з таблиць, які в свою чергу складаються з рядка заголовків стовпців (полів) і одного або більше рядків (записів) значень даних кожного стовпця. Ці стовпці і рядки повинні мати такі характеристики:

- кожному стовпцю таблиці присвоєно унікальне ім'я;
- у полі на перетині рядка і стовпця будь-якої таблиці завжди є тільки одне значення даних;
- кожен рядок таблиці має одну і ту ж кількість стовпців;
- всі рядки таблиці обов'язково відрізняються один від одного хоча б одним значенням, що дає змогу однозначно ідентифікувати будь-який рядок такої таблиці.

В якості реляційної БД для зберігання даних та організації доступу до них була обрана БД PARADOX 7.0, внаслідок простоти і наочності SQL-запитів і невеликого обсягу даних, які повинні бути в ній збережені.

Для отримання вичерпної інформації про архітектуру нейромережі, в базу даних повинна бути занесена інформація про:

- поточну кількість нейронів у вхідному шарі мережі;
- поточні значення ваг для кожного нейрона.

У той час, як заздалегідь кількість нейронів у мережі, до проведення операції навчання, є числом невідомим, то кількість ваг для кожного нейрона завжди дорівнює 256. З одного боку, для проведення операції пошуку було б зручним відвести для кожного ваги нейрона свій стовпець у таблиці, але, таким чином ми досягнемо надлишковості інформації і ускладнення SQL-запитів. Іншим варіантом є збереження значень ваг в 16-ти змінних типу String, в яких дані можна розділити умовними знаками. У нашому випадку як роздільник використовувалася «;».

Таким чином, кінцевий варіант таблиці повинен мати три стовпці (поля):

- номер нейрона в мережі;
- номер рядка, що містить ваги нейрона;

- безпосередньо сам рядок.

Напишемо приклад організації SQL -запиту до цієї таблиці. У разі , якщо нам потрібно виділити всі ваги, належать якому-небудь нейрона, то синтаксис запиту буде виглядати наступним чином:

```
select WeightStr, SameString from NNetData where Neuron=:SameNeuron
```

де *NNetData* - назва таблиці;

*SameNeuron* - номер нейрона, дані про який ми хочемо отримати.

Як видно з форми запиту, за такої організації таблиць здійснення пошуку потрібного нейрона і даних про нього є нескладним завданням. Аналогічно відбувається і запис в таблицю даних, отриманих в результаті навчання мережі:

```
insert into NNetData (Neuron, WeightStr, SameString) values (:Neur, :Weight, :Str),
```

де

*Neur* – номер навченого нейрона,

*Weight* – номер поточного рядка ваг нейрона;

*Str* – рядок з черговими 16-ма вагами.

Окрім таблиць з даними мереж, потрібно створити окрему таблицю, в якій будуть зберігатися еталонні зображення. З одного боку, таблиця характеристик нейронної мережі вже містить дані про еталони у вигляді значень ваг нейронів. Проте варто зауважити, що в результаті навчання не завжди ваги нейронів адекватно реагують на еталонні зображення, що може призвести до відчутних помилок. Тому таблицю еталонних зображень можна використовувати для проведення аналізу результатів навчання мережі, а також аналізу результатів розпізнавання, для одержання найбільш повної інформації про мережу. Створення таблиці еталонів не є складною процедурою з причин одноманітності збереженої в них інформації. Як вже згадувалося, еталонні зображення мають розмір 20×60 пікселів, значення яких дорівнює 0 або 1. Запис інформації є аналогічним описаному вище.

## Висновки

1. Запропонована система керування роботою ШГВУ розроблена за класичним підходом автоматизації промислових установок із зворотним зв'язком. Унікальністю системи є використання нейронної мережі. Ефективність роботи такої системи залежить від значної кількості факторів. Перш за все – це структурний і параметричний синтез нейронної мережі, формування вхідних даних для навчання мережі та її роботи, адекватність математичної моделі установки та ін.

2. Приведення вхідних даних до одного стандарту підвищує універсальність схеми, що дає можливість використовувати одну і ту саму схему в різних системах керування, де вхідними даними можуть бути динамограми, струмограми чи ватметрограми. Таке рішення дає можливість ефективно реалізувати запропоновану систему на відносно простих мікроконтролерах та суттєво здешевити виготовлення і монтаж схеми.

3. Аналіз мереж прямого поширення показав, що за певних умов багат шаровий перцепрон задовільняє всім вимогам до системи керування, але при ускладненні (зашумленні) вхідних даних ця мережа може давати неправильний результат, що робить неможливим її використання в керуванні роботою ШНВУ.

4. Проведені дослідження показали, що рекурентні нейронні мережі, зокрема нейронна мережа Хемінга дає можливість при невеликих апаратних ресурсах ефективно розпізнавати необхідну кількість зображень з достатньою точністю. В роботі запропонована модифікація мережі та розроблений алгоритм, який суттєво збільшує швидкодію розпізнавання вхідного зображення, що дає змогу працювати системі в режимі реального часу.

5. Використання повноцінної бази даних в сукупності із нейромережею дає змогу ефективніше працювати з отриманими зображеннями. Зокрема, такий підхід полегшує та прискорює поповнення, редагування та сортування навчальної вибірки зображень. Завдяки такому рішенню є можливість

використовувати готові програмні продукти, які пришвидшують інтеграцію окремої системи керування ШГВУ в загальну АСУ ТП нафтового родовища.

Викладені в розділі матеріали опубліковані в роботах [8, 75, 84, 87, 174].

## РОЗДІЛ 3

### МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ ШНВУ

#### 3.1. Особливості системи електроприводу ШНВУ

Внаслідок значних мас рухомих елементів ШНВУ система електроприводу має момент інерції, який набагато переважає момент інерції двигуна, що приводить в рух верстат-гойдалку [11, 23, 117]. Крім того, різні ланки установки здійснюють не тільки обертальний рух, але і поступальний, внаслідок чого система електроприводу має циклічно-змінний момент інерції, у зв'язку з чим процеси в електроприводах ШНВУ є динамічними не тільки в пускових, але й в усталених режимах роботи. Зрештою, у разі періодичної експлуатації під час простоювання установки у свердловину разом з рідиною попадає пісок, внаслідок чого створюється додаткове навантаження в перший момент пуску [2, 36]. Саме цими особливостями визначаються вимоги як до електродвигуна, так і до системи електроприводу в цілому. До них належать:

а) циклічний закон зміни створюваного глибиннопомповою установкою навантаження на валу привідного двигуна, який змінюється зі зміною дебіту свердловини, глибини залягання нафти та інших геологічних умов і факторів;

б) періодично-змінний момент інерції рухомих частин, величина якого залежить не тільки від положення помпи, але й швидкості її переміщення;

в) значна тривалість періоду повного циклу роботи установки, яка може складати від кількох до кільканадцяти секунд, оскільки період обертання вала кривошипа в кількасот разів більший від періоду зміни напруги живлення;

г) значна інерційність рухомих частин установки.

Привідний двигун повинен відповідати вимогам до електроприводів з циклічно-змінним навантаженням й моментом інерції [56, 89, 100], мати значну перевантажувальну здатність і більший від номінального русійний момент.

### **3.2. Основні вимоги до системи автоматичного керування роботою електроприводу ШНВУ**

Технологічний процес видобування нафти за допомогою ШНВУ потребує надійних систем контролю та керування [5, 36, 54, 89], причому ефективна експлуатація ШНВУ можлива лише на основі автоматичного керування, а це потребує розроблення комплексу програм, за допомогою якого можна аналізувати її роботу засобами математичного моделювання. Поза тим, відомі програмні засоби для керування роботою ШНВУ [3, 36, 39, 54, 127] не відповідають сучасним вимогам щодо швидкодії й адекватності.

Для прийняття рішення щодо визначення завдання на керування роботою ШНВУ необхідно мати часові залежності координат системи електроприводу на періоді, отримати які можна за допомогою програмних засобів, що мають швидкодію, яка переважає за часом реальний перебіг процесів. Очевидно, що оперативно отримати їх шляхом розрахунку перехідного електромеханічного процесу у зв'язку з великою його тривалістю неможливо. Тому важливо мати програми, які засновані на математичних методах, за допомогою яких можна розрахувати періодичний режим в позачасовій області. Оперативний аналіз отриманих періодичних кривих координат режиму дає змогу в реальному часі формувати завдання на керування роботою установки, а отримати достовірні результати можна лише на підставі використання математичних моделей механічної та електричної частин електроприводу ШНВУ високого рівня адекватності.

Основними вимогами до алгоритмів функціонування системи автоматичного керування роботою ШНВУ є висока швидкодія і адекватність отриманих результатів. Вони протирічливі, оскільки підвищення точності потребує використання складних моделей елементів електромеханічної системи установки, а ускладнення моделей призводить до зростання часу на розрахунок режимів і прогнозних характеристик. Тому необхідно віднайти компроміс між складністю математичної моделі і точністю отриманих результатів.

Необхідна для забезпечення відповідності відбору рідини з свердловини її притоку частота гойдань балансира верстата-гойдалки визначається з одного боку геологічними умовами свердловини, а з другого – параметрами ШНВУ, як-то геометричні розміри верстата-гойдалки, максимальна довжина ходу плунжера помпи тощо. Завдання потрібної швидкості обертання ротора АД в системі керування залежить від рівня адекватності математичної моделі електроприводу верстата-гойдалки. Таким чином, для керування процесом нафтовидобування за допомогою ШНВУ [36, 48], і перш за все на основі інтелектуальних систем [44, 69, 110, 98, 133, 150], необхідно мати достовірну інформацію про закон зміни навантаження верстата-гойдалки (динамограму), і адекватні математичні моделі, які описують динаміку функціонування як механічної частини установки, так і електричної, в тому числі й системи керування електроприводом ШНВУ [72], у їх взаємозв'язку.

### **3.3. Математичні моделі елементів системи електроприводу ШНВУ**

**3.3.1. Математична модель верстата-гойдалки.** Верстат-гойдалка – це чотириланковий механізм [11, 50, 126], за допомогою якого відбувається перетворення обертального руху вихідного вала редуктора у зворотно-поступальний рух плунжера глибинної помпи. Він є найбільш навантаженим в механічному плані, оскільки на його елементи діють сили, зумовлені як вагою штанг разом із плунжерною помпою та рідиною в ній, так і сили тяжіння зрівноважувальних вантажів, маси яких можуть складати від кількох сотень кілограмів до кількох тонн [23, 36].

Відомі в літературі математичні моделі верстатів-гойдалок [115, 117, 170] є або надто спрощені, або, незважаючи на значну їх складність, не враховують важливі чинники, які впливають на точність результатів розрахунку, зокрема, зміну швидкості обертання кривошипа впродовж циклу роботи установки тощо. Зрештою, їх складно використати як окремий модуль динамічної математичної моделі ШНВУ [89]. Розроблена в [90] математична модель



верстата-гойдалки, яка використана в роботі, дає змогу на основі аналізу планарної схеми перетворювального механізму (рис.3.1) за його геометричними розмірами, а також масами зрівноважувальних вантажів та схемою їх розміщення встановити зв'язок між законом зміни сили  $P_0$ , яка діє на головку балансира в точці підвішування штанг, і моментом на валу двигуна, а також за швидкістю обертання його ротора визначати миттєве значення приведеного до валу АД моменту інерції  $J$ , що є основою для розрахунку динаміки електроприводу ШНВУ.

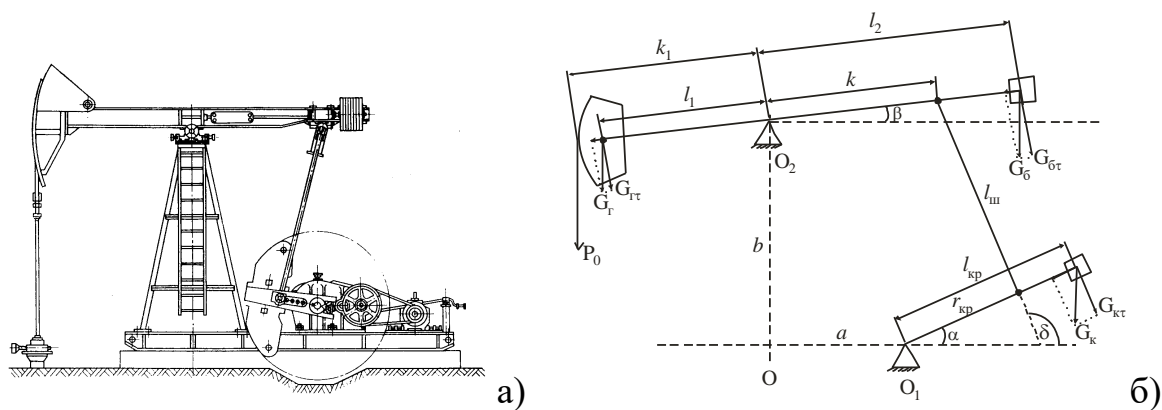


Рис. 3.1. ШНВУ (а) та кінематична схема верстата-гойдалки (б).

Періодична залежність моменту навантаження на валу АД визначається не тільки формою динамограми, але й кінематичною схемою верстата-гойдалки (рис. 3.1). Зокрема, статичний момент навантаження на валу кривошипного валу визначається за формулою [90]

$$M_{кр}(\alpha) = (P_0 k_1 + (G_2 l_1 - G_6 l_2) \cos \beta) \cdot \frac{r_{кр} \sin(\alpha - \delta)}{k \sin(\delta - \beta)} - G_к l_к \cos(\alpha), \quad (3.1)$$

де

$P_0 = P_{max} P_0^*(\alpha)$  – сила, яка діє на полірований шток в точці підвішування штанг ( $P_0^*(\alpha)$  – закон зміни зусилля, яке діє на полірований шток і визначене з динамограми);

$G_{2б}, G_6, G_к$  – сили тяжіння, які діють на головку балансира, вантаж на балансири та на кривошипі відповідно;

$l_1, l_2, l_k$  – відстані від осі обертання балансира (індекс  $l$ ) до центру ваги головки та до центру ваги вантажу на ньому (індекс  $2$ ); від осі обертання кривошипа до центру ваги вантажу (індекс  $k$ );

$\beta$  – кут повороту балансира;

$\delta$  – кут між шатуном і горизонтальною віссю  $x$  (рис. 3.1).

Оскільки зусилля від кривошипного вала до ротора двигуна передаються через редуктор та пасову передачу (передавальне число  $k_i$ ), прикладений до валу двигуна момент навантаження визначається за формулою [89]

$$M_e(\alpha) = M_{кр}(\alpha) / (k_i k_\eta), \quad (3.2)$$

де  $k_\eta$  – коефіцієнт, який визначає втрати в пасовій передачі, редукторі та з'єднанні балансір-шатун верстата-гойдалки.

Сумарний момент інерції  $J$  всієї системи електроприводу ШНВУ залежить від кута  $\alpha$  повороту кривошипа та швидкості  $\omega_{\partial\partial}$  обертання ротора і впродовж періоду обертання кривошипа змінюється за періодичним законом, тобто є функцією кута  $\alpha$ . Він визначається як сума моментів інерції всіх елементів: редуктора, який складається із моментів інерції зубчастих коліс; кривошипа; шатуна; розміщених на кривошипі та балансірі противаг; балансира; головки балансира; колони штанг разом з нафтою та плунжером помпи. Приведення до валу двигуна моментів інерції окремих мас системи, які мають обертальний та поступальний рух, здійснюється за формулою [56]

$$J = J_{\partial\partial} + \sum_{i=1}^n J_i \left( \frac{\omega_i}{\omega_{\partial\partial}} \right)^2 + \sum_{j=1}^k m_j \left( \frac{v_j}{\omega_{\partial\partial}} \right)^2, \quad (3.3)$$

де

$J_{\partial\partial}, \omega_{\partial\partial}$  – момент інерції ротора двигуна разом зі шківом та кутова швидкість обертання ротора двигуна;

$J_i, \omega_i$  – момент інерції та кутова швидкість обертання  $i$ -го елемента;

$m_j, v_j$  – маса та лінійна швидкість переміщення  $j$ -го елемента системи.

Моменти інерції двигуна  $J_\partial$  та редуктора  $J_p$  задаються у каталогах. Решта моментів інерції визначаються за відомими [56] формулами.

Кутова швидкість обертання балансира визначається за формулою

$$\omega_{\delta} = \frac{\omega_{\delta\delta}}{k_i} \frac{d\beta}{d\alpha},$$

де

$\omega_{\delta\delta}$  – швидкість обертання ротора двигуна;

$k_i = k_{ui} \cdot k_p$  – передавальне число від вала двигуна до кривошипа ( $k_{ui}$  – передавальне число пасової передачі, а  $k_p$  – редуктора).

Лінійна швидкість руху штанг разом з помпою та рідиною визначається як похідна від переміщення полірованого штока за формулою [89]

$$v = \frac{dS}{dt} = k_1 \frac{\omega_{\delta\delta}}{k_i} \frac{d\beta}{d\alpha}.$$

Наведені аналітичні залежності є основою для комп'ютерного аналізу роботи ШНВУ. Розроблена у вигляді окремого модуля математична модель верстата-гойдалки дає змогу за представленою у вигляді  $P_0^* = P_0^*(\alpha)$  розгорнутою динамограмою, а також визначеною з повної системи рівнянь динаміки електроприводу швидкістю обертання кривошипа визначити закон  $M_c^* = M_c^*(\alpha)$  зміни моменту на валу АД і моменту інерції  $J = J(\alpha)$  установки.

**3.3.2. Математична модель двигуна електроприводу ШНВУ.** Питання вибору привідного двигуна верстата-гойдалки має принципове значення, оскільки для забезпечення надійного пуску він повинен мати підвищений пусковий момент. Це зумовлено тим, що статичний момент навантаження під час пуску, може значно перевищувати його значення в усталеному режимі внаслідок збільшення сил тертя рухомих частин, наявності піскових корків тощо [6, 97, 106]. Цим вимогам задовольняють АД з подвійною кліткою ротора або глибокопазі [64, 65], в яких підвищення рушійного моменту досягається внаслідок явища витіснення струму (скін-ефекту) в стержнях. Математична модель АД повинна адекватно враховувати, крім насичення магнітопроводу, явище скін-ефекту, без врахування якого визначити електромагнітний момент двигуна з достатньою точністю неможливо, а тому загальновідомі класичні

заступні схеми [61, 65, 107, 149] для аналізу динаміки АД з витісненням струму в стержнях ротора непридатні. Оскільки створювати адекватні системи керування роботою установки на основі такого підходу неможливо, то в останні роки у зв'язку з необхідністю створення інтелектуальних систем появились роботи, в яких використовуються розроблені на основі заступних схем із змінними за певними законами параметрами [149]. Однак для вирішення задачі динаміки АД вони малоприсади, а оскільки польові моделі непридатні для використання в засобах керування внаслідок громіздкості і невисокої швидкодії, математична модель АД повинна бути компромісною щодо точності та складності. Таким умовам задовольняють математичні моделі, побудовані на основі колових методів аналізу, в яких потокозчеплення контурів та власні і взаємні індуктивності визначаються на основі нелінійних характеристик намагнічування елементів магнітопроводу АД [134], а витіснення струму шляхом представлення обмотки ротора кількома обмотками, отриманими внаслідок розділення стержнів по висоті на елементарні [20, 21, 163].

Іншим чинником, який впливає на обсяг обчислень і відповідно на швидкодію програми, є вибір системи координатних осей, в яких записана система рівнянь електромагнітної рівноваги. В роботі використовується математична модель АД, розроблена на основі теорії зображувальних векторів [134] в системі ортогональних осей  $x, y$ , яка дає змогу з невеликим обсягом обчислень враховувати як насичення, так і витіснення струму. Потокозчеплення контурів визначаються на основі використання кривих намагнічування основним магнітним потоком  $\psi_\mu$  та потоками розсіювання обмоток  $\psi_{\sigma_s}$  статора та  $\psi_{\sigma_r}$  ротора, представлених у вигляді

$$\Psi_\mu = \Psi_\mu(i_\mu); \quad \Psi_{\sigma_s} = \Psi_{\sigma_s}(i_s); \quad \Psi_{\sigma_r} = \Psi_{\sigma_r}(i_r). \quad (3.4)$$

де  $i_\mu, i_s, i_r$  – модулі зображувальних векторів відповідних струмів: намагнічування, статора та ротора

$$i_\mu = \sqrt{(i_{sx} + i_{rx})^2 + (i_{sy} + i_{ry})^2}, \quad (3.5)$$

де

$$i_s = \sqrt{i_{sx}^2 + i_{sy}^2}; \quad i_r = \sqrt{i_{rx}^2 + i_{ry}^2}.$$

Оскільки стержень розділений по висоті на  $n$  елементів, то струми ротора визначаються як сума струмів у них

$$i_{rx} = \sum_{j=1}^n i_{rjx}; \quad i_{ry} = \sum_{j=1}^n i_{rjy}. \quad (3.6)$$

У відомих [36, 41, 97, 170, 171] методах аналізу режимів роботи ШНВУ динаміка процесів в АД впродовж циклу роботи помпи не розглядається взагалі, а швидкість обертання ротора приймається постійною. Однак, оскільки момент  $M_c$  навантаження, який створює верстат-гойдалка, має періодично-змінний характер, стаціонарні режими електроприводу ШНВУ є динамічними навіть в системі ортогональних осей  $x, y$ .

Система ДР електричної рівноваги контурів статора з урахуванням розбиття кожного стержня ротора по висоті на  $n$  елементарних в матрично-векторній формі має вигляд

$$\frac{d\vec{\psi}_{sxy}}{dt} = \Omega_0 \vec{\psi}_{sxy} - R_s \vec{i}_{sxy} + \vec{u}_{sxy}, \quad (3.7a)$$

де

$$\vec{\psi}_{sxy} = \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{sxy} = \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \end{bmatrix}; \quad R_s = \begin{bmatrix} r_s & \\ & r_s \end{bmatrix}; \quad \Omega_0 = \begin{bmatrix} & -\omega_0 \\ \omega_0 & \end{bmatrix}; \quad \vec{u}_{sxy} = \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \end{bmatrix}$$

– вектори потокозчеплень ( $\vec{\psi}_s$ ), струмів ( $\vec{i}_s$ ), напруг живлення ( $\vec{u}_s$ ) контурів статора та матриці активних опорів ( $R_s$ ) і допоміжна ( $\Omega_0$ ), в якій  $\omega_0$  – кутова частота напруги живлення.

Аналогічно система ДР електричної рівноваги контурів ротора АД має вигляд

$$\frac{d\vec{\psi}_{rxy}}{dt} = \Omega_r \vec{\psi}_{rxy} - R_r \vec{i}_{rxy}, \quad (3.7b)$$

де

$$\vec{\psi}_{rxy} = \begin{bmatrix} \vec{\psi}_{r1} \\ \vdots \\ \vec{\psi}_{rn} \end{bmatrix}; \quad \vec{\psi}_{r\xi} = \begin{bmatrix} \psi_{r\xi x} \\ \psi_{r\xi y} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{rxy} = \begin{bmatrix} \vec{i}_{r1} \\ \vdots \\ \vec{i}_{rn} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{r\xi} = \begin{bmatrix} i_{rx\xi} \\ i_{ry\xi} \end{bmatrix};$$

$$R_r = \begin{bmatrix} R_{r1} & & \\ & \ddots & \\ & & R_{rn} \end{bmatrix}; \quad R_{r\xi} = \begin{bmatrix} r_{r\xi} & \\ & r_{r\xi} \end{bmatrix}; \quad \Omega_r = \begin{bmatrix} \Omega & & \\ & \ddots & \\ & & \Omega \end{bmatrix};$$

$$\Omega = \begin{bmatrix} & \omega_0 - \omega \\ -\omega_0 + \omega & \end{bmatrix}; \quad (\xi = 1, \dots, n)$$

– вектори потокозчеплень ( $\vec{\psi}_{rxy}$ ), струмів ( $\vec{i}_{rxy}$ ) і діагональна матриця ( $R_r$ ) приведених до обмотки статора еквівалентних активних опорів контурів ротора (індекси –  $1, \dots, n$ ).

Динаміка руху ротора описується рівнянням (механічної рівноваги)

$$M_e - M_c = M_\partial, \quad (3.8)$$

де

$M_c$  – момент навантаження на валу АД,

$M_\partial$  – динамічний момент системи електроприводу;

$M_e$  – електромагнітний момент, який в координатних осях  $x, y$  визначається за формулою [134]

$$M_e = 1,5 p_0 (\psi_{sx} i_{sy} - \psi_{sy} i_{sx}),$$

де  $p_0$  – кількість пар полюсів.

Рівняння для активної та реактивної потужностей мають вигляд

$$P = 1,5(u_{sx} i_{sx} + u_{sy} i_{sy}); \quad Q = 1,5(u_{sy} i_{sx} - u_{sx} i_{sy}).$$

Система ДР (3.7), (3.8) є основою розрахунку режимів роботи, незалежно від того, які процеси розглядаються. Однак у разі несинусідного живлення обмотки статора необхідно використовувати, так звану, нерухому трифазну систему координат [113, 134].

### 3.4. Математичне моделювання стаціонарного режиму електроприводу

Внаслідок періодично-змінного характеру моменту навантаження ШНВУ та моменту інерції усталений режим роботи електроприводу є періодичним, тому він описується системою не алгебричних рівнянь, а диференціальних, яка складається із векторних ДР (3.7а, 3.7б) електричної рівноваги та рівняння руху ротора (3.8), яке в розгорнутій формі має вигляд

$$M_e - M_c(t + T_t) = \frac{J}{p_0} \frac{d\omega}{dt} + \frac{\omega}{2p_0} \frac{dJ}{dt}, \quad (3.9)$$

де

$T_t$  – часовий період зміни навантаження, тривалість якого визначається повним циклом роботи помпи;

$\omega$  – кутова швидкість обертання ротора;

$J$  – приведений до валу двигуна момент інерції системи електроприводу.

Для визначення моменту інерції рухомих частин ШНВУ необхідно знати миттєві значення кутових швидкостей елементів, що мають обертальний рух, та лінійних швидкостей переміщення мас (стовп рідини, штанги тощо), які рухаються поступально. Зв'язок між ними визначається математичною моделлю верстата-гойдалки, а швидкість обертання ротора двигуна, визначається з рівнянь (3.7), (3.9) електромеханічної рівноваги системи електроприводу.

Важливо відзначити, що внаслідок циклічної зміни моменту на валу АД та моменту інерції установки електроприводу ШНВУ результатом розрахунку стаціонарного режиму є не сукупність координат, які відповідають деякому моменту часу  $t$ , а їх функціональні залежності впродовж періоду циклічної зміни моменту навантаження. Задача отримання цих залежностей набагато складніша від розрахунку усталеного режиму за постійного моменту навантаження.

Періодичний динамічний режим можна розрахувати методом усталення, в якому результат отримують шляхом розв'язування задачі Коші в часовій області, суть якого полягає в безпосередньому інтегруванні системи ДР (3.7),

(3.9) до досягнення періодичної зміни координат. Однак внаслідок значної інерційності установки перехідний процес є довготривалим, внаслідок чого розрахунок методом усталення непридатний для вирішення задач автоматичного керування.

Найбільш ефективним способом знаходження періодичних залежностей координат є розв'язування доточкової крайової задачі [92, 102], що дає змогу отримати розв'язок з мінімальним обсягом обчислень. Відомі методи розв'язування крайових задач відрізняються способом алгебризації ДР та крайовими умовами. Практика показала, що найбільш ефективними серед них є проєкційні методи [102, 136]. В розробленому алгоритмі періодичні залежності координат стаціонарного режиму визначаються шляхом розв'язування нелінійної двоточкової крайової задачі для системи ДР першого порядку з періодичними крайовими умовами, розробленим на основі апроксимації координат режиму сплайнами третього порядку.

Відзначимо, що процеси в системі електроприводу ШНВУ змінюються з періодом  $T=2\pi$ , який відповідає одному обертові кривошипа, тоді як часовий період наперед невідомий, тому необхідно перейти від часових залежностей до залежностей від кута  $\alpha$  повороту кривошипа. Часова координата  $t$  зв'язана з координатою  $\alpha$  повороту кривошипа залежністю  $d\alpha/dt = \omega/p_0k_i$ . Здійснивши перехід від похідних по  $t$  до похідних по  $\alpha$ , отримаємо систему ДР

$$\begin{aligned}\frac{d\vec{\psi}_{sxy}}{d\alpha} &= \xi \left( \Omega_0 \vec{\psi}_{sxy} - R\vec{i}_{sxy} + \vec{u}_{sxy} \right); \\ \frac{d\vec{\psi}_{rxy}}{d\alpha} &= \xi \left( \Omega_r \vec{\psi}_{rxy} - R\vec{i}_{rxy} \right); \\ \frac{d\omega}{d\alpha} &= \xi \frac{p_0}{J(\alpha)} \left( M_e - M_c(\alpha) \right) - \frac{\omega}{2J(\alpha)} \frac{dJ(\alpha)}{d\alpha},\end{aligned}\tag{3.10}$$

де  $\xi = p_0k_i / \omega$ , яку можна записати у вигляді одного векторного рівняння

$$\frac{d\vec{y}(\vec{x})}{d\alpha} = \vec{z}(\vec{y}, \vec{x}, \vec{u}_{xy}, M_c, \alpha),\tag{3.11}$$



де

$$\vec{x} = \text{colon}(\vec{i}_{sxy}, \vec{i}_{rxy}, \omega); \vec{u}_{xy} = \text{colon}(\vec{u}_{sxy}, 0, 0); \vec{y} = \text{colon}(\vec{\psi}_{sxy}, \vec{\psi}_{rxy}, \omega);$$

$\vec{z}$  – вектор правих частин системи ДР (3.10);

$M_c(\alpha)$  – періодична залежність моменту навантаження від кута  $\alpha$ .

Здійснивши апроксимацію координат на сітці  $N$  вузлів періоду з кроком  $h = 2\pi/N$  у відповідності з викладеним в [92], отримаємо алгебричний аналог системи ДР (3.10), яка має порядок  $m$ , у вигляді нелінійної системи алгебричних рівнянь  $Nm$ -го порядку вигляду

$$H\vec{Y}(\vec{X}) = \vec{Z}(\vec{Y}, \vec{X}), \quad (3.12)$$

де

$H$  – блочно–діагональна матриця переходу від неперервних координат до їх вузлових значень, елементи якої визначаються виключно сіткою вузлів;

$$\vec{Y} = \text{colon}(\vec{y}_1, \dots, \vec{y}_n); \vec{Z} = \text{colon}(\vec{z}_1, \dots, \vec{z}_n); \vec{X} = \text{colon}(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$$

– вектори-стовпці, утворені зі значень відповідних величин у вузлах сітки;

$$\vec{y}_j = \text{colon}(\vec{\psi}_{sxyj}, \vec{\psi}_{rxyj}, \omega), \quad \vec{x}_j = \text{colon}(\vec{i}_{sxyj}, \vec{i}_{rxyj}, \omega), \quad (j = 1, \dots, N).$$

Активна та реактивна потужності для  $j$ -го вузла періоду визначаються за формулами [134]

$$P_j = 1,5(u_{sxj}i_{sxj} + u_{syj}i_{syj}); Q_j = 1,5(u_{syj}i_{sxj} - u_{sxj}i_{syj}).$$

Рівняння (3.12) є дискретним аналогом системи ДР (3.11). Його розв'язком є значення вектора  $\vec{X}$ , який складений із векторів значень струмів та швидкості обертання ротора АД у вузлах періоду. Внаслідок його нелінійності для розв'язування використовується ітераційний метод Ньютона [103], згідно з яким на  $k$ -ій ітерації приріст вектора  $\vec{X}$  визначається за формулами

$$\vec{X}^{(k+1)} = \vec{X}^{(k)} - \Delta\vec{X}^{(k)}; \quad W\Delta\vec{X}^{(k)} = \vec{Q}^{(k)}, \quad (3.13)$$

де  $\vec{Q}^{(k)}$  – вектор нев'язок системи (3.11) при значенні вектора  $\vec{X} = \vec{X}^{(k)}$ .

Для забезпечення збіжності ітераційного методу використовується метод продовження по параметру [45], суть якого у даному випадку полягає в дискретному нарощуванні вимушуючих сил. Проте до системи ДР (3.11) входять дві збуджуючі дії: вектор прикладених напруг і зумовлений дією сили  $P_h^*(\alpha)$  момент  $M_c(\alpha)$  опору на валу АД. Одночасно нарощувати напругу живлення та момент навантаження неможливо, оскільки ці величини зв'язані між собою нелінійно. Тому задача розрахунку стаціонарного періодичного режиму необхідно розв'язується у два етапи. На першому з них нарощуємо вектор  $\vec{U} = colon(\overline{u_1}, \overline{u_n})$  вузлових значень прикладених напруг від нуля до номінального значення за умови близького до нуля постійного ковзання, якому відповідає усталений режим роботи АД за відсутності навантаження. Отримане значення вектора  $\vec{X}^{(0)} = colon(\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)$  є початковою умовою для визначення координат режиму при заданому періодичному законі зміни моменту навантаження, тобто на другому етапі, суть якого полягає в наступному.

За визначеними з першого етапу розрахунку координат обчислимо вектор нев'язок системи (3.12) при значенні вектора  $\vec{X} = \vec{X}^{(0)}$  й утворимо нелінійну систему рівнянь вигляду

$$N\vec{Y} - \vec{Z} = (1 - \lambda)\vec{Q}^{(0)}.$$

Зміна параметра  $\lambda$  від  $\lambda = 1$  до  $\lambda = 0$  еквівалентна зменшенню вектора нев'язок  $\vec{Q}^{(0)}$  до нуля, а вектор  $\vec{X}$  при цьому прямує від  $\vec{X} = \vec{X}^{(0)}$  до значення, що відповідає розв'язку векторного рівняння (3.12), який уточнюємо методом Ньютона.

### 3.5. Динамічні та статичні режими роботи електропроводу ШНВУ

Для надійної безперебійної роботи ШНВУ і встановлення економічно доцільної системи керування нею необхідно здійснювати постійний контроль і аналіз параметрів режиму роботи всього обладнання. Зважаючи на широкий

діапазон зміни швидкості гойдань балансира, постає задача визначення, які режими можна розглядати як квазістатичні, а для яких таке припущення призводить до значних похибок. Ця проблема має важливе практичне значення, тому що аналіз динамічних режимів роботи ШНВУ потребує використання більш складних математичних моделей, а у разі можливості розгляду задачі як статичної можна здійснювати моніторинг і керування роботою установки з використанням простих математичних моделей. Це дає змогу здійснювати індивідуальне мікропроцесорне керування роботою установки.

**3.5.1. Усталений динамічний режим.** Як зазначалось, стаціонарний режим роботи електроприводу ШНВУ в ортогональному базисі  $x$ ,  $y$  характеризується періодичною зміною перетворених координат з періодом  $T=2\pi$ , що дає змогу отримати періодичні залежності координат викладеним вище методом розв'язування крайової задачі [92]. Однак для малодобітних свердловин частота гойдань балансира порівняно невелика, а отже в кожній точці динамограми процес можна вважати квазіусталеним і розраховувати режим роботи установки як сукупність статичних режимів, що значно скорочує час на обробку інформації. Для цього необхідно для кожної нафтовидобувної установки свердловини попередньо визначити межу допустимості використання рівнянь статички в залежності від частоти гойдань балансира, що дає змогу під час автоматизованого керування роботою вибирати відповідне математичне і програмне забезпечення. Суть такого дослідження можна виконати з використанням викладеного в п.3.5 алгоритму, який дає можливість виконати розрахунки стаціонарних режимів роботи ШНВУ при різних середніх значеннях частоти обертання кривошипного вала. Приклад результатів розрахунку періодичної залежності створюваного верстатом-гойдалкою моменту навантаження на валу АД і електромагнітного моменту при різних частотах гойдань балансира наведено на рис. 3.2. Як видно з рисунка, зі збільшенням швидкості обертання кривошипного вала різниця між зазначеними моментами зростає внаслідок збільшення динамічної складової моменту. Постає задача: за якої швидкості можна користуватись рівняннями

статики, а за якої таке припущення призводить до значних похибок, а отже потребує використання рівнянь динаміки.

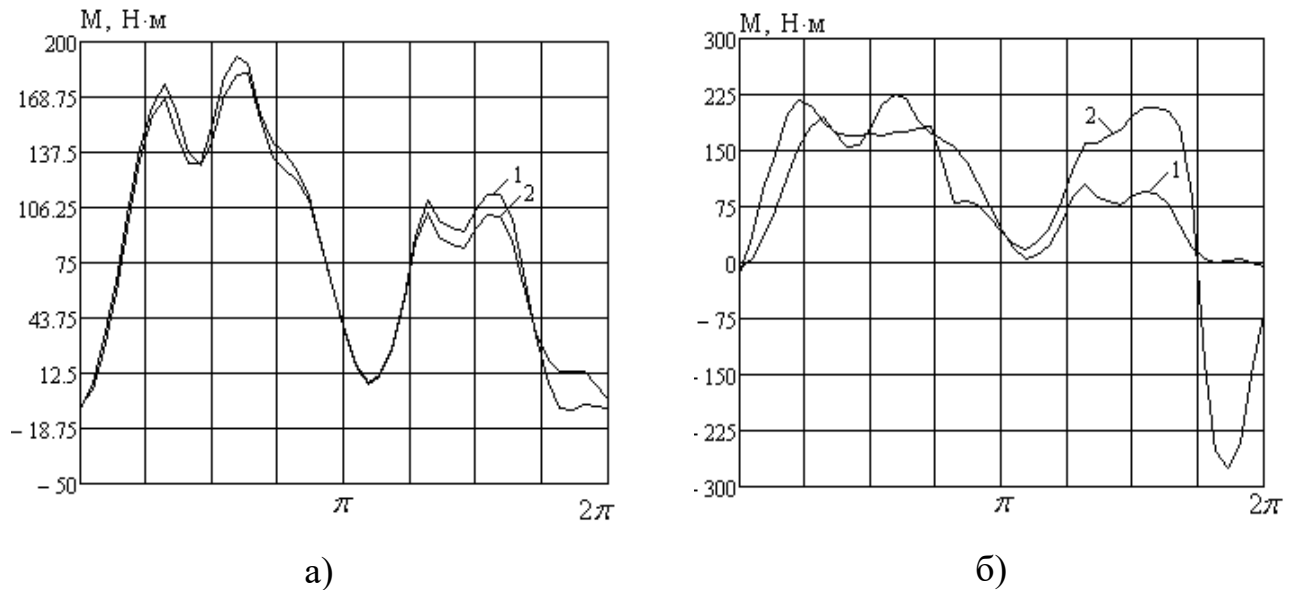


Рис. 3.2. Залежності відносних значень моментів навантаження (1) та електромагнітного (2) при різних частотах обертання кривошипного вала:

(а) – 4 об/хв, (б) – 12 об/хв.

Про допустимість використання рівнянь статики можна судити на підставі середньоквадратичного відхилення між моментом навантаження і електромагнітним

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (M_c(\alpha) - M_e(\alpha))^2 d\alpha}. \quad (3.14)$$

На рис. 3.3а зображена залежність вираженої в процентах величини  $\delta$  від швидкості обертання кривошипного вала для режиму роботи установки, за якого навантаження в точці підвішування штанг змінюється згідно з наведеною на рис. 3.3б розгорнутою динамограмою.

Як видно з рис. 3.3а, середньоквадратичне відхилення перевищує 5% при швидкості обертання кривошипа  $n \geq 10$  об/хв. Очевидно, що це значення для різних динамограм роботи верстата-гойдалки і різних зрівноважень буде

відрізнятись. Тому, перш ніж програмувати систему керування установкою, необхідно за рівняннями (3.10) згідно з викладеним в п. 3.5 алгоритмом розрахунку стаціонарних режимів розрахувати зображену на рис. 3.3а залежність  $\delta = \delta(n_{kp})$ , яка слугуватиме основою для визначення припустимості використання рівнянь статички для аналізу роботи ШНВУ.

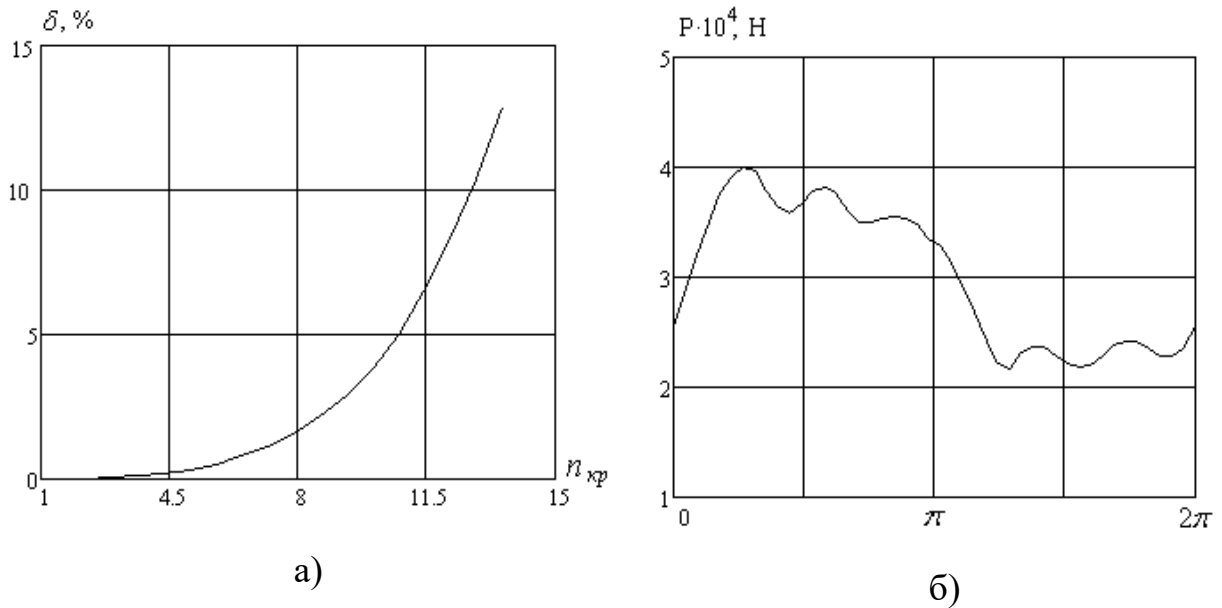


Рис. 3.3. Залежність середньоквадратичного значення різниці між моментом навантаження і електромагнітним моментом АД від швидкості обертання кривошипного вала (а) в режимі роботи із зображеною на рисунку (б) динамограмою.

**3.5.2. Усталений статичний режим.** За умови постійної швидкості обертання ротора АД рівняння електромагнітної рівноваги в осях  $x$ ,  $y$  є не диференціальними, а нелінійними алгебричними, причому нелінійність зумовлена виключно насиченням магнітопроводу. Зважаючи на те, що витіснення струму в стержнях фактично відсутнє внаслідок малих значень ковзання, немає необхідності розбивати стержні на елементи, а рівняння електричної рівноваги (3.7) при заданому постійному ковзанні  $s$  мають вигляд

$$\Omega \vec{\psi}_{xy} + R \vec{i}_{xy} = \vec{u}_{xy}, \quad (3.15)$$

де

$$\vec{\psi}_{xy} = \begin{bmatrix} \psi_{sx} \\ \psi_{sy} \\ \psi_{rx} \\ \psi_{ry} \end{bmatrix}; \quad \vec{i}_{xy} = \begin{bmatrix} i_{sx} \\ i_{sy} \\ i_{rx} \\ i_{ry} \end{bmatrix}; \quad \vec{u}_{xy} = \begin{bmatrix} u_{sx} \\ u_{sy} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad \Omega = \begin{bmatrix} & -\omega_0 & & \\ \omega_0 & & & \\ & & & s\omega_0 \\ & & -s\omega_0 & \end{bmatrix}$$

– вектори потокозчеплень  $\vec{\psi}_{xy}$ , струмів  $\vec{i}_{xy}$  та напруг  $\vec{u}_{xy}$  АД, а  $R = \text{diag}(r_s, r_s, r_r, r_r)$  – діагональна матриця активних опорів статора (індекс  $s$ ) та ротора (індекс  $r$ ).

Розв’язком нелінійної системи рівнянь (3.15) при значенні ковзання  $s \in$  вектор  $\vec{i}_{xy}$  струмів контурів АД, які дають змогу визначити значення компонент вектора  $\vec{\psi}_{xy}$  потокозчеплення та електромагнітного моменту.

Для отримання залежностей струмів контурів та електромагнітного моменту в інтервалі періоду зміни зусилля в точці підвішування штанг згідно із динамограмою роботи верстата-гойдалки необхідно:

а) використовуючи розгорнуту динамограму роботи ШНВУ як залежність від кута  $\alpha$  повороту кривошипа сили  $P_0^* = P_0^*(\alpha)$ , яка діє в точці підвішування штанг, визначити періодичну залежність моменту на валу АД  $M_c(\alpha)$  на основі математичної моделі верстата-гойдалки згідно з п. 3.3;

б) вибрати на періодичній кривій  $M_c(\alpha)$  ряд вузлових точок і для кожної з них за статичною механічною характеристикою АД, приймаючи момент  $M_c(\alpha)$  рівний електромагнітному, визначити ковзання  $s$ ;

в) для кожного значення ковзання з нелінійної системи (3.12) алгебричних рівнянь визначити струми і на їх основі потокозчеплення та інші необхідні величини.

Викладений алгоритм не потребує ні значних обчислювальних ресурсів, ні значних витрат часу на обчислення, однак обмежується малою кількістю гойдань балансира, тобто повільно-змінними процесами.

### 3.6. Ідентифікація параметрів функціонування ШНВУ

Залежності векторів дискретних значень струмів, споживаної потужності, моменту на валу АД та сили яка діє в точці підвішування штанг, взаємопов'язані. Ці зв'язки визначаються рівнянням (3.12), яка зв'язує між собою періодичні залежності вузлових значень координат, які описують стаціонарний режим роботи системи електроприводу ШНВУ, з відповідними координатами (вузловими значеннями) динамограми. Результатом розрахунку при заданому законі  $P_0 = P_0(S)$  є значення вектора  $\vec{X} = (\vec{x}_1, \dots, \vec{x}_n)^*$ , де  $\vec{x}_j = (\vec{i}_j, \omega_j)^*$ ,  $(j=1, \dots, n)$ , на підставі якого згідно з математичною моделлю АД обчислюються вузлові значення поточкозчеплень контурів та електромагнітного моменту, а також швидкість обертання кривошипа.

Очевидно, що в системі дискретних алгебричних рівнянь (3.12) невідомим може бути вектор будь-яких координат, у тому числі й вектор  $\vec{P}_0^*(\alpha) = colon(p_1^*, \dots, p_n^*)$ , утворений з вузлових значень координат динамограми роботи верстата-гойдалки. Очевидно, що можна розв'язати й обернену задачу: за відомою залежністю  $M_c = M_c(\alpha)$  моменту на валу АД визначити залежність  $P_0 = P_0(\alpha)$ , яка відтворює динамограму. Зокрема, з (3.1) можна визначити періодичну залежність

$$P_0(\alpha) = \frac{k \sin(\delta - \beta)}{r_{kp} \sin(\alpha - \delta)} (k_\eta k_i M_c(\alpha) + G_\kappa l_\kappa \cos(\alpha)) - \frac{(G_2 l_1 - G_\delta l_2) \cos(\beta)}{k_1}. \quad (3.16)$$

Отже на підставі закону зміни потужності чи струму двигуна можна, використовуючи розроблену математичну модель електроприводу ШНВУ, визначити закон зміни сили, що діє на полірований шток, який є відображенням динамограми [4, 32, 116]. Приклад результатів розрахунку наведено рис.3.4.

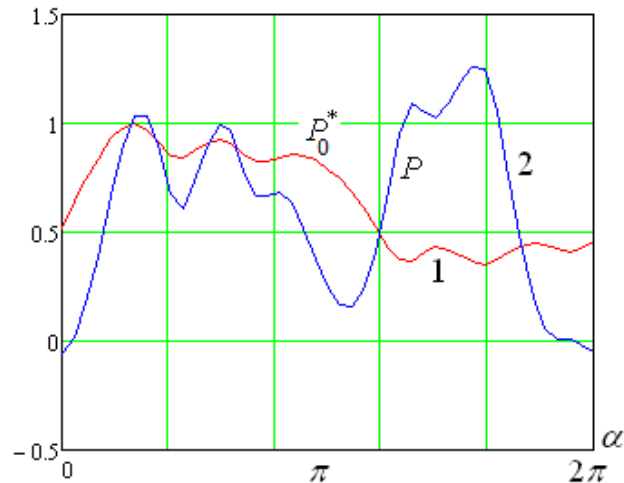


Рис. 3.4. Розгорнута динамограма роботи верстата-гойдалки (1) та періодична залежність споживаної потужності двигуна (2) у відносних одиницях.

Алгоритм розрахунку періодичних залежностей електричних та механічних координат в стаціонарних режимах роботи електроприводу ШНВУ методом розв'язування крайової задачі є основою для діагностики роботи плунжерної помпи. Отримані на основі математичної моделі дані у вигляді зусилля у полірованому штокові в функції положення кривошипа, подаються до персонального комп'ютера для подальшої обробки. Ці дані використовуються для побудови динамограми і на її основі визначення поточного стану обладнання свердловини безпосередньо за вимірними значеннями струмів або потужності. Аналіз та обробка результатів, дає можливість з використанням алгоритму діагностики вибрати та встановити необхідний режим роботи ШНВУ, а також запобігти аварійним ситуаціям.

### **3.7. Збалансований режим роботи електроприводу ШНВУ малодебітної свердловини**

Важливим завданням у технології видобування нафти є покращення техніко-економічних показників електроприводів ШНВУ. Від раціонального



вибору електроприводу установки та системи керування нею залежить ефективність експлуатації установки в цілому, а отже й енерговитрати на тонну видобутої нафти, які можуть сягати 50% [40]. Вибір обладнання й режиму його роботи повинні відповідати продуктивності пласта свердловини, яка з плином часу зменшується згідно із емпірично встановленим [25] законом

$$q_c(t) = q_0 \left( 1 - \left( \frac{t}{T_0} \right)^m \right), \quad (3.17)$$

де

$q_0$  – початковий дебіт нафти на час введення в експлуатацію свердловини або після ремонту;

$T_0$  – визначений умовами експлуатації ШНВУ інтервал часу, через який установку зупиняють для ремонту або заміни помпи. Значення  $m$  лежить в межах  $m = 1,45-3,3$ . (Для більшості свердловин –  $m = 2,0$  [25]).

При виборі АД за потужністю варто виходити з необхідності його повного використання в процесі роботи, оскільки у разі завищення номінальної потужності двигуна знижуються техніко-економічні показники електроприводу (ККД, коефіцієнт потужності тощо) [93]. Тому важливо забезпечити зміну режиму роботи верстата-гойдалки так, щоб він відповідав темпові наповнення свердловини нафтою. Оптимальним є режим роботи системи свердловина-помпа, за якого встановлена рівновага між кількістю видобутої рідини та надходженням її до свердловини з пласта, а коефіцієнт заповнення помпи знаходиться у межах  $k_3 = 0,8-0,9$ . Цього можна досягнути, регулюючи кількість ходів верстата-гойдалки так, щоб зберегти встановлене значення коефіцієнта заповнення незмінним.

За один оберт кривошипа відбувається повний цикл переміщення (вверх і вниз) плунжера глибинної помпи. Миттєве значення продуктивності плунжерної помпи верстата-гойдалки, виражене в  $m^3/c$  видобутої рідини, можна визначити за формулою

$$q(t) = \lambda \frac{\pi D^2}{4} S_0 \frac{\omega(t)}{p_0 k_i}, \quad (3.18)$$

де

$\lambda$  – коефіцієнт подачі помпи, який визначається як відношення теоретично можливого об'єму рідини до реального, який на практиці дещо менший в результаті витікання її з циліндра помпи лежить в межах  $0,6 \leq \lambda \leq 0,8$ ;

$D$  – діаметр плунжера помпи;

$S_0$  – довжина шляху переміщення плунжера визначена з урахуванням видовження колони штанг і труб;

$k_i$  – передавальне число від валу двигуна до кривошипа.

Для отримання максимально можливого видобутку нафти з мінімальними затратами необхідно, щоб швидкість обертання ротора АД, якою визначається частота гойдань балансира, змінювалась у відповідності до зміни дебіту пласта. Кожному значенню продуктивності пласта відповідає своя динамограма, а значить і періодична залежність моменту навантаження на валу АД та залежності всіх координат, у тому числі й швидкості обертання кривошипного вала. Розрахувати їх можна лише на підставі повної системи рівнянь, що описують як механічну частину ШНВУ, так і систему електроприводу [89].

Для вирішення поставленої задачі доповнимо нелінійну систему алгебричних рівнянь (3.12) рівнянням вигляду (3.18), записаним для кожного  $j$ -го вузла періоду

$$q_j = \frac{\lambda \pi D^2 S_0}{4 p_0 k_i} \omega_j, \quad (j=1, \dots, n). \quad (3.19)$$

Векторне рівняння (3.12) разом із скалярними рівняннями (3.19) можна подати у вигляді нелінійної системи алгебричних рівнянь вигляду

$$\vec{F}(\vec{Y}, \vec{X}) = \vec{0}, \quad (3.20)$$

де вектори  $\vec{Y}, \vec{X}$  складаються з вузлових значень векторів

$$\vec{y}_j = \text{colon}(\vec{\psi}_{sxyj}, \vec{\psi}_{rxyj}, \omega_j, q_j), \quad \vec{x}_j = \text{colon}(\vec{i}_{sxyj}, \vec{i}_{rxyj}, \omega_j, q_j).$$

Дослідження поведінки системи електроприводу при зміні продуктивності пласта здійснюється диференціальним методом розрахунку статичних характеристик періодичних процесів [92, 134]. Для цього систему алгебричних рівнянь (3.20) диференціюємо по  $q_c$ . У результаті отримаємо

$$H \frac{d\vec{Y}}{d\vec{X}} - \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{Y}} \frac{d\vec{Y}}{d\vec{X}} - \frac{\partial \vec{Z}}{\partial \vec{X}} \frac{d\vec{X}}{dq_c} = \frac{\partial \vec{Z}}{\partial q_c},$$

де відповідні похідні, що входять до матриці Якобі – це блочно-діагональні матриці, елементами яких є диференціальні індуктивності АД [134], зокрема

$$\left. \frac{d\vec{y}}{d\vec{x}} \right|_j = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline L_{sxsxj} & L_{sxsyj} & L_{sxxj} & L_{sxyj} & & \\ \hline L_{sysxj} & L_{sysyj} & L_{syxj} & L_{syyj} & & \\ \hline L_{rxsxj} & L_{rxsyj} & L_{rxxj} & L_{rxyj} & & \\ \hline L_{rysxj} & L_{rysyj} & L_{ryxj} & L_{ryyj} & & \\ \hline & & & & 1 & \\ \hline & & & & & 1 \\ \hline \end{array}$$

Інтегруючи систему ДР (3.21) числовим методом по  $q_c$ , отримаємо багатовимірну характеристику у вигляді періодичних залежностей вузлових координат (компонент вектора  $\vec{X}$ ) стаціонарного режиму від продуктивності пласта. На кожному крокові інтегрування чи ітераційного уточнення диференціальні індуктивності контурів АД визначаються з урахуванням насичення згідно описаною в п. 3.3.2.

Для прикладу, на рис.3.5 наведені періодичні залежності значення моменту навантаження та електромагнітного моменту АД 4AP160S4У3 ( $P_n = 15$ кВт,  $U_n = 380/220$ В), що відповідають різним значенням продуктивності помпи ( $q = 0,018; 0,014; 0,012; 0,010$  м<sup>3</sup>/с) і, відповідно, різним середнім значенням швидкості обертання кривошипного вала ( $n_{кр} = 18,5; 16,5; 13,5; 12,0$  об/хв) збалансованого верстата-гойдалки 7СК8-3,5-4000, при яких забезпечується неперервна робота ШНВУ з максимальним заповненням помпи. Аналогічні періодичні залежності має кутова швидкість обертання ротора, середнє значення якої використовується для керування електроприводом установки.

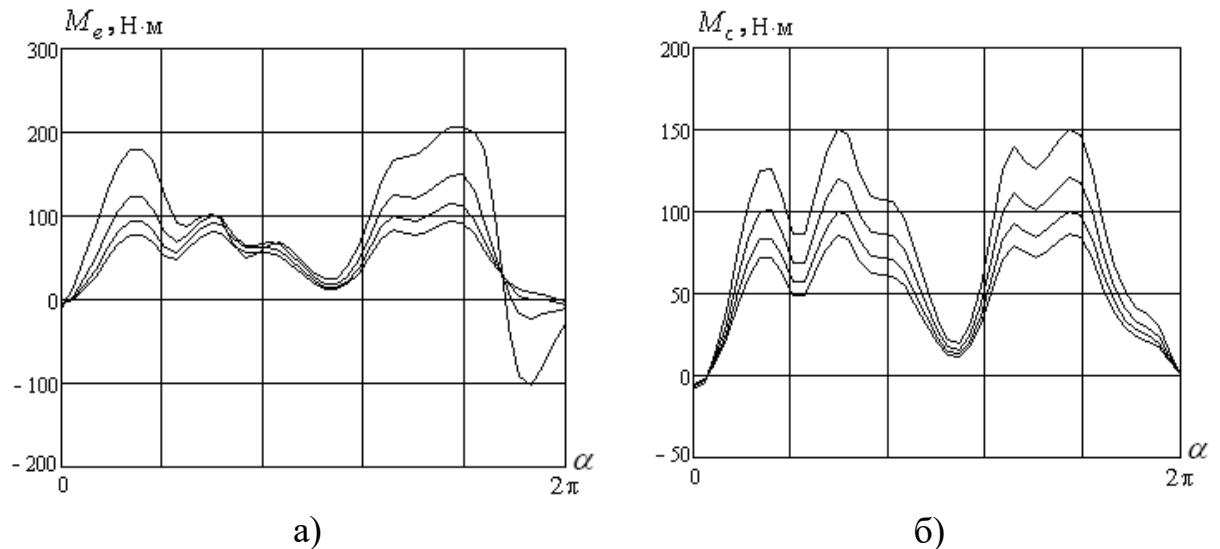


Рис.3.5. Періодичні залежності електромагнітного моменту АД (а) та моменту навантаження (б) при різних значеннях продуктивності ( $q = 0,018; 0,014; 0,012; 0,010 \text{ м}^3/\text{с}$ ).

Розроблений алгоритм дає змогу визначати частоту гойдань балансира верстата-гойдалки в залежності від зміни дебіту пласта, що відповідає неперервній роботі установки з максимально можливим заповненням помпи протягом усього міжремонтного періоду.

### 3.8. Вплив частоти гойдань балансира ШНВУ на роботу електроприводу

Викладені в розділі 2 методи діагностики стану підземного обладнання свердловин дають змогу отримувати з високою достовірністю динамограми роботи ШНВУ, однак програмні засоби, за допомогою яких можна здійснювати автоматизоване керування роботою установок, відстають від потреб практики. Для застосування автоматизованих систем керування необхідно мати достовірну інформацію не тільки про стан нафтовидобувного обладнання, але й визначати обмеження, які витікають з умов надійної роботи системи електроприводу.

Регулювання швидкості електроприводу ШНВУ потребує вирішення задачі про визначення низки різних показників: діапазону регулювання, гранично допустимих меж зміни моменту навантаження, величини струму статора тощо. Зміна дебіту свердловини потребує зміни темпу відбору нафти, що зводиться до встановлення відповідних різних швидкостей гойдань балансира. Однак її не завжди можна змінювати в необхідних межах, оскільки можуть виникати перевантаження АД за нагріванням [48] або максимальним значенням навантаження [6, 65]. Для визначення допустимих меж зміни темпів відбору нафти і формування обмежень необхідно провести попередні дослідження, а це можна здійснити лише шляхом математичного моделювання.

Складність вирішення цієї проблеми для електроприводу ШНВУ зумовлена двома факторами. По-перше, вхідною величиною є не скалярне значення моменту навантаження, а його функціональна періодична залежність. По-друге, залежність між зусиллям, яке діє на балансир в точці підвішування штанг, і моментом на валу АД визначається складною нелінійною кінематичною залежністю, яка трансформує періодичний закон зміни зусилля, що діє на балансир, в закон зміни моменту на валу АД (рис. 3.6). Крім цього, АД має нелінійну залежність між моментом навантаження АД і електромагнітним.

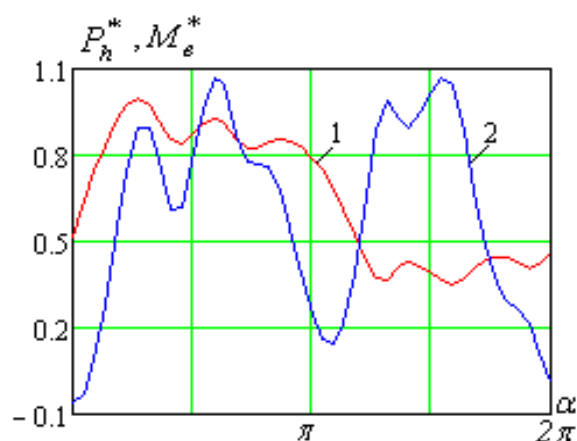


Рис. 3.6. Періодичні залежності відносного значення  $P_h^* = P/P_{max}$  зусилля (1) в точці підвішування штанг та електромагнітного моменту  $M_e^*$  двигуна (2)

Проблему забезпечення ефективної роботи ШНВУ, у тому числі й невідповідність відбору нафти її притоку, можна розв'язати лише на основі комплексної математичної моделі двигуна, верстата-гойдалки і системи керування у їх взаємозв'язку. Першим кроком при цьому є встановлення взаємозв'язків між динамограмою, яка визначає періодичний закон зміни зусилля, яке діє в точці підвішування штанг, частотою гойдань балансира, передавальним числом між валом АД і вихідним валом редуктора. Розв'язання цієї задачі дасть змогу удосконалити методи керування роботою ШНВУ, визначити обмеження, які зумовлені специфікою роботи її електроприводу, і тим самим підвищити енергоефективність і надійність роботи та збільшити міжремонтний період роботи ШНВУ [30, 144].

Продуктивність плунжерної помпи верстата-гойдалки, можна визначити за формулою (3.18). Оскільки момент навантаження є періодично-змінною величиною, то величина  $q(t)$  також змінюється за періодичним законом. Отже кількість видобутої за один цикл роботи ШНВУ нафти можна визначити за середнім за період значенням

$$Q_c = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt.$$

Прирівнявши дебіт нафти в свердловину з продуктивністю помпи за один цикл роботи, можна отримати середню за період швидкість обертання ротора АД, яка забезпечує баланс між притоком і відбором. Поза тим, реалізація такої залежності пов'язана з обмеженнями роботи АД в системі електроприводу ШНВУ як за перевантажувальною здатністю двигуна, так і його тепловому навантаженню. Розглянемо задачу визначення цих обмежень на основі описаної в п.3.5 математичної моделі електроприводу ШНВУ і алгоритму розрахунку періодичних залежностей координат режиму роботи на основі розв'язування крайової задачі.

Система (3.11) скінченних рівнянь  $m$ -го порядку дає змогу не тільки розрахувати усталений режим, але й дослідити вплив на режим роботи

установки зміни будь-якої координати  $\chi$ , яка до нього входить (наприклад, амплітуди або частоти напруги живлення, моменту інерції тощо). Для цього необхідно її продиференціювати по цьому параметру [45]. В результаті отримаємо систему ДР

$$W \frac{d\vec{X}}{d\chi} = \frac{\partial \vec{F}}{\partial \chi}. \quad (3.21)$$

Інтегруючи чисельним методом систему ДР (3.21) по змінній  $\chi$ , отримуємо багатовимірну статичну характеристику періодичного процесу як сукупність стаціонарних режимів (векторів  $\vec{X}$ ), які відповідають різним значенням змінної  $\chi$ . Такий алгоритм розрахунку характеристик дає змогу визначити на основі відомої динамограми гранично можливі за тими чи іншими показниками стаціонарні динамічні режими роботи ШНВУ. Зауважимо, що для різних координат  $\chi$  системи ДР вигляду (3.21) будуть відрізнятися тільки вектором правих частин, що дає змогу за єдиним алгоритмом розв'язувати задачі розрахунку різних статичних характеристик періодичних режимів [92].

Розроблений метод і алгоритм розрахунку режимів роботи ШНВУ дає змогу визначати необхідну частоту гойдань балансира в залежності від зміни дебіту пласта і формувати допустимі межі її регулювання, які визначаються перевантаженням двигуна моментом [64, 65] та нагріванням [48].

Як приклад, на рис. 3.7а наведені розраховані у відповідності з викладеним алгоритмом періодичні залежності активної потужності, а на рис. 3.7а – діючого значення струму при різних значеннях частоти обертання кривошипа, які відповідають зображеній на рис. 3.5 динамограмі, для двигуна 4AP160S4Y3 ( $P_n=15\text{кВт}$ ,  $U_n=380/220\text{В}$ ), що приводить в рух верстат-гойдалку 7СК8-3,5-4000.

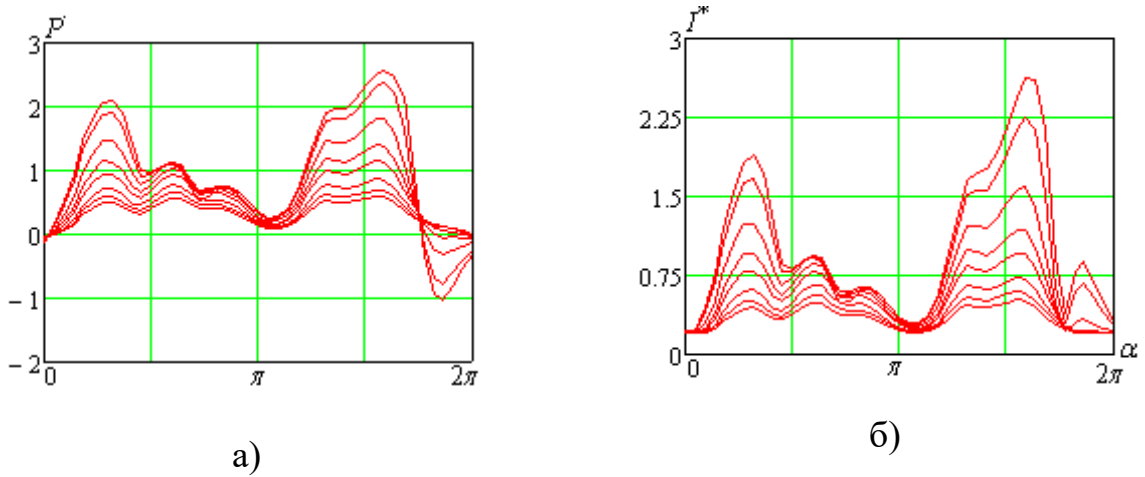


Рис. 3.7. Періодичні залежності відносних значень споживаної двигуном активної потужності  $P$  (а) та струму двигуна (б) при різних значеннях частоти обертання кривошипа.

На рис. 3.8а та рис. 3.8б наведено статичні характеристики, отримані шляхом оброблення розрахованих періодичних залежностей координат, які дають змогу визначити граничні умови регулювання, що впливають з обмежень роботи двигуна за допустимим середнім за період значенням потужності (рис. 3.8а) та струму (рис. 3.8б), а також перевантажувальну здатність за моментом. Аналіз результатів розрахунку показує, що при заданій динамограмі (рис. 3.4) допустимою є швидкість обертання ротора АД, за якої швидкість обертання кривошипа не перевищує 10 об/хв.

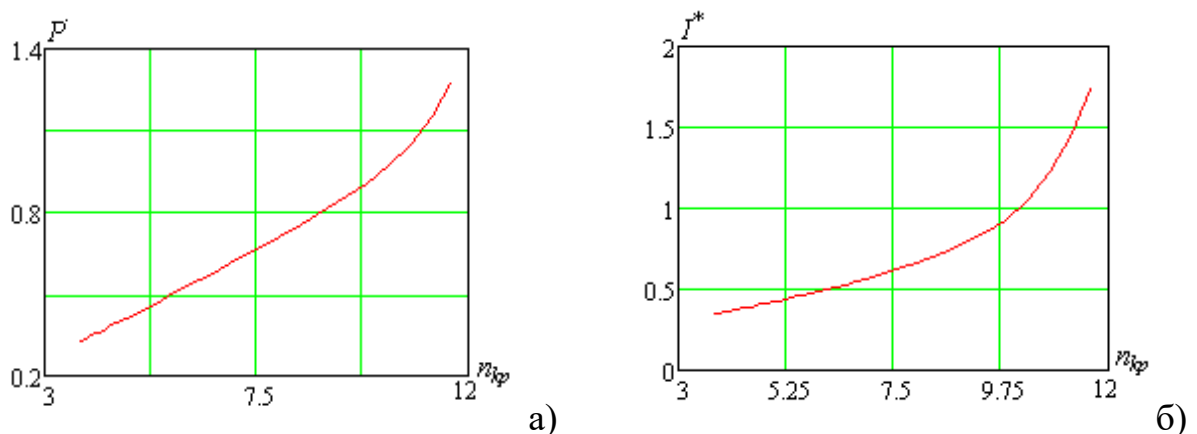


Рис. 3.8. Залежності відносних значень споживаної двигуном активної потужності  $P$  (а) та струму двигуна (б) від частоти обертання кривошипа.



### 3.9. Розрахунок механічних характеристик приводних асинхронних двигунів ШНВУ при різних частотах напруги живлення

У зв'язку зі зміною коефіцієнта заповнення помпи малодебітної свердловини для забезпечення збалансованого режиму роботи електроприводу ШНВУ виникає потреба в регулюванні темпів відбору нафти із свердловини, що можна здійснити шляхом регулювання швидкості обертання ротора АД. Такий спосіб є одним із найбільш економічно доцільних [4, 15, 73, 108, 112, 124, 148, 153], оскільки дає змогу працювати ШНВУ з порівняно високими значеннями коефіцієнта заповнення помпи та  $\cos \varphi$  АД [93, 170], що підвищує ефективність експлуатації свердловини.

В сучасних асинхронних електроприводах для регулювання швидкості обертання ротора застосовують перетворювачі частоти [112]. Такий спосіб регулювання забезпечує високі техніко-економічні показники, оскільки частотно-керований електропривод відкриває широкі можливості використання АД в якісно нових технологічних процесах і забезпечує високу енергоефективність. Розроблення надійних і якісних мікропроцесорних систем дає змогу з високою точністю керувати роботою електроприводу відповідно до вимог конкретного технологічного процесу, що не тільки забезпечує його якість, але й економію електроенергії. Теоретичні й практичні аспекти частотного керування викладені в [106, 107, 120], а особливості й аналіз використання в нафтовидобувній галузі – в [142, 147]. Однак проблема розроблення методів дослідження механічних характеристик АД при різних законах зміни напруги живлення, незважаючи на велику кількість публікацій, залишається не вирішеною на належному рівні. Зокрема, розроблені алгоритми мають в своїй основі схеми заміщення АД, які не дають змоги з достатньою достовірністю розраховувати механічні характеристики, оскільки не враховують коректно насичення та витіснення струму.

Як відомо, зміною частоти напруги живлення АД можна плавно регулювати кутову швидкість обертання магнітного поля статора. Для

електроприводів з малим діапазоном регулювання і порівняно невисокими динамічними властивостями використовують так зване скалярне керування [108, 124], яке є простим в реалізації. На відміну від векторного, воно засноване на використанні модулів величин, якими визначається електромагнітний момент. Оскільки електромагнітні процеси залежать від внутрішніх параметрів АД, то неточність їх визначення призводить до значних відхилень швидкості обертання ротора від заданої [108], що пояснюється неточністю визначення електромагнітного моменту. Це зумовлено тим, що в алгоритмах керування частотно-регульованими асинхронними електроприводами використовуються математичні моделі АД, побудовані на основі заступних схем або лінійних диференціальних рівнянь, а механічні характеристики розраховуються за формулою Клосса, яка є наближеною.

**Алгоритм розрахунку характеристик.** Основою алгоритму є розрахунок усталеного режиму роботи АД при заданому ковзанні  $s$ , який описується системою нелінійних алгебричних рівнянь вигляду (3.15), в якій:  $u_{sx} = U_m$ ;  $u_{sy} = 0$ , кутова частота  $\omega_0$  і напруга  $U_m$  є змінними величинами.

Її розв'язком є значення компонент вектора струмів

$$\vec{i} = \text{colon}(i_{sx}, i_{sy}, i_{r1x}, i_{r1y}, \dots, i_{mx}, i_{my}),$$

які залежать від величини напруги живлення і її частоти.

Суть розрахунку усталеного режиму полягає у визначенні векторів струмів та поточозчеплень контурів двигуна, з використанням яких можна визначити електромагнітний момент, активну і реактивну потужності тощо. Статична характеристика розраховується як сукупність усталених режимів, кожен з яких розраховується методом продовження по параметру [45], суть якого полягає в поступовому збільшенню прикладеної напруги від нуля до заданого значення. Це дає змогу на кожному крокові забезпечити збіжність ітераційного процесу методу Ньютона [103] і за кілька кроків отримати значення вектора струмів  $\vec{i}$  при заданому значенні амплітуд фазних напруг  $U_m$ . Отримані значення вектора

$\vec{i}$  є початковими умовами для розрахунку характеристик як залежностей координат від ковзання:

$$\vec{i} = \vec{i}(s); \quad \vec{\psi} = \vec{\psi}(s). \quad (3.21)$$

Таким чином, алгоритм розрахунку статичної характеристики складається з двох етапів: на першому здійснюється розрахунок усталеного режиму роботи АД при заданих значеннях ковзання і напруги живлення обмотки статора, а на другому – розрахунок багатовимірної статичної характеристики як залежностей  $\vec{i} = \vec{i}(s)$  координат вектора струмів контурів від ковзання. При цьому напруга і частота приймаються незмінними, а ковзання змінюється в заданих межах. Для розрахунку статичної механічної характеристики АД при заданій частоті напруги живлення необхідно розрахувати режим при значенні ковзання  $s = 1,0$  і заданому значенні амплітуди напруги живлення, а потім, поступово зменшуючи величину ковзання з кроком  $\Delta s$  до нуля, ітераційним методом розрахувати багатовимірну залежність  $\vec{i} = \vec{i}(s)$ , а отже і  $\vec{\psi} = \vec{\psi}(s)$  та механічну характеристику.

На рис. 3.9 наведені результати розрахунку механічних статичних характеристик двох типів АД однакової потужності, один з яких має звичайне виконання (4A160S4Y3), а другий – підвищений пусковий момент (4AP160S4Y3) за рахунок подвійної клітки ротора, при різних частотах напруги живлення за умови регулювання напруги згідно із законом  $U_m / f = const$ .

Аналіз результатів розрахунків (рис. 3.9а) та (рис. 3.9б) свідчить, що вигляд частотних характеристик електромагнітного моменту для АД з різною формою пазів короткозамкненої обмотки ротора суттєво відрізняються, а зниження напруги пропорційно до зменшення частоти не повністю забезпечує незмінність перевантажувальної здатності АД.

Регулювання частоти гойдань балансира зміною частоти напруги живлення АД електроприводу ШНВУ потребує визначення електричних величин. Очевидно, що формування обмежень за величиною струму потребує

визначення його середньоквадратичного значення за період, а за моментом – максимального значення на періоді.

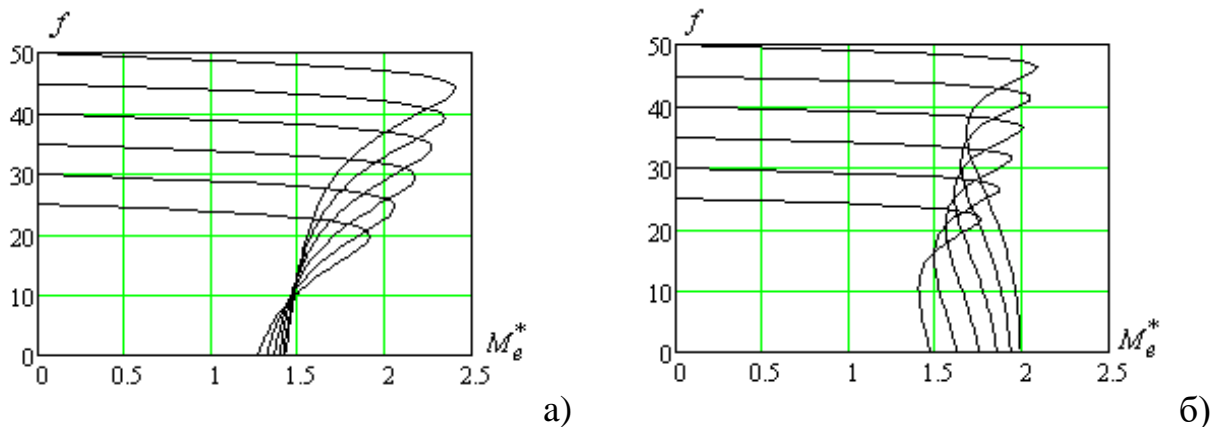


Рис.3.9. Механічні характеристики двигунів 4A160S4Y3 (а) і 4AP160S4Y3 (б), розраховані при різних частотах напруги живлення за умови регулювання напруги за законом  $U_m / f = const$ .

На рис.3.10 наведені результати виконаних розрахунків для електроприводу ШНВУ на основі АД з номінальними даними:  $P_n = 15$  кВт;  $I_n = 29,9$  А;  $M_n = 97$  Н·м,  $p_0 = 2$ . Зокрема, зображеній на рис.3.3б динамограмі відповідають наведені на рис. 3.10а періодичні залежності відносних значень струму та електромагнітного моменту АД, а на рис.3.10б – кутової швидкості обертання вала кривошипа (середня швидкість  $n_{кр} = 10,4$  об/хв.).

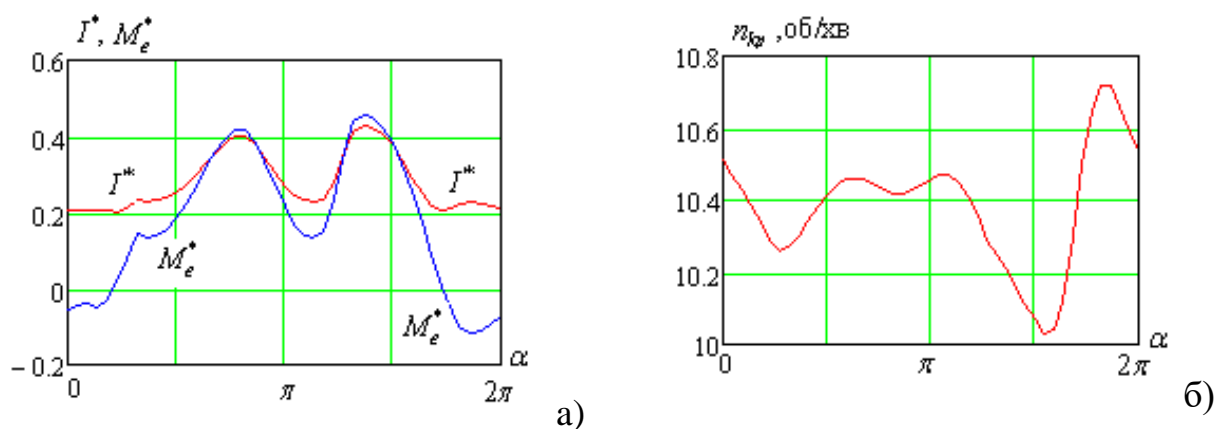


Рис. 3.10. Періодичні залежності діючого значення струму та електромагнітного моменту АД (а) й швидкості обертання вала кривошипа (б).

Використовуючи періодичні криві наведеного на рис.3.10 вигляду, можна визначити середні за один цикл роботи верстата-гойдалки значення активної та реактивної потужностей, коефіцієнта потужності та середньокваратичного значення струму статора двигуна тощо та закони їх зміни в функції частоти.

Результати розрахунків, отриманих за умови регулювання одночасно з частотою напруги її амплітуди за законом  $U_m / f = const$ , наведені на рис.3.11. Як видно з цих рисунків, при цьому відбувається зменшення струму обмотки статора, активної і реактивної потужностей, що призводить до зростання коефіцієнта потужності. Середнє за період значення електромагнітного моменту при цьому незмінне.

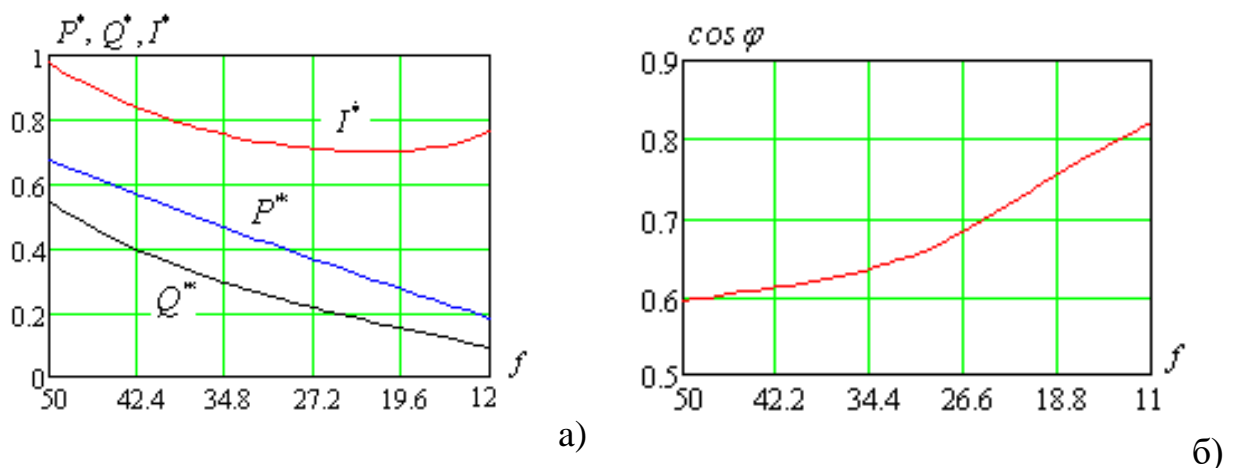
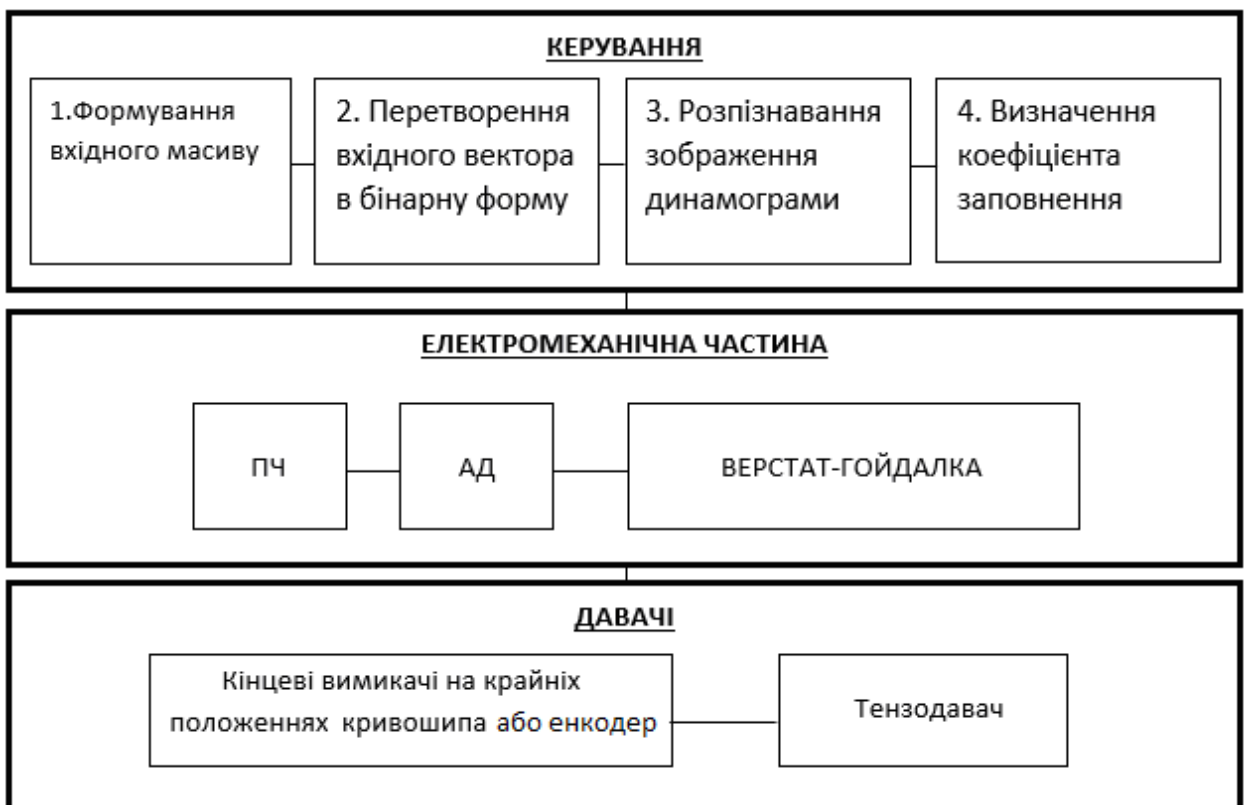


Рис.3.11. Залежності середніх за один цикл роботи верстата-гойдалки значень активної і реактивної потужностей та середньокваратичного значення струму двигуна в функції частоти за умови регулювання напруги за законом  $U_m/f = const$ .

Насамкінець зазначимо, що розроблений алгоритм дає змогу виконувати математичне моделювання режимів і характеристик системи електроприводу ШНВУ і при інших законах регулювання напруги живлення та її частоти.

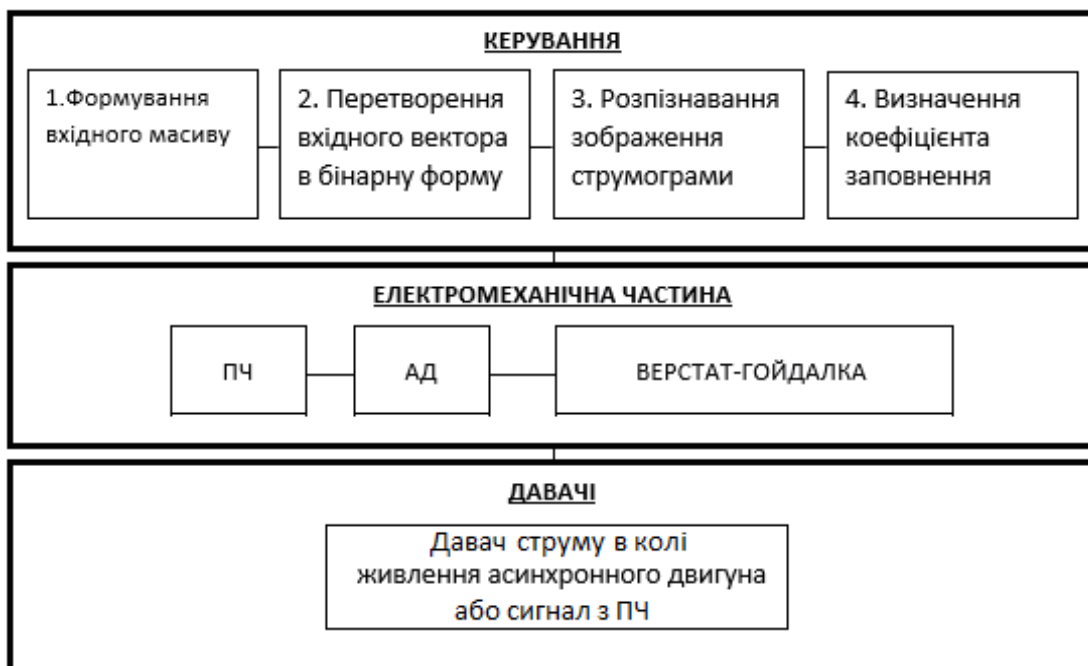
### 3.10. Моделювання роботи ШНВУ малодебітної свердловини в середовищі MATLAB SIMULINK

Для проведення експериментів з різними типами нейронних мереж розроблено комп'ютерну модель електромеханічної системи ШНВУ в середовищі Simulink програмного пакету MATLAB. Ключовими елементами такої схеми є блоки, які описують електромеханічну частину ШНВУ, в тому числі АД та перетворювач частоти, система давачів та блок керування в основі якого є нейронна мережа. Оскільки алгоритм розпізнавання зображень є універсальним, то на його вхід можна подавати дані різних типів. Тому розроблено дві структури, де окремо виділено роботу з динамограмами та струмограмами. Зокрема, структурна схема загальної моделі нафтовидобувної установки з автоматичним керуванням показана на рис.3.12а. Особливістю схеми є можливість розпізнавати стан свердловини за динамограмами знятими з допомогою тензодавача, встановленого на полірованому штоці верстата-гойдалки.



а)

На рис. 3.12б показана вдосконалена схема, де відсутні давачі, а є тільки давач струму, тому керуючий сигнал розраховується на основі зображення струмограм. Таке рішення зменшує кількість елементів схеми та кількість проміжних розрахунків.



б)

Рис. 3.12. Структурні схеми загальної моделі нафтовидобувної установки з автоматичним керуванням: можливістю розпізнавання динамограм (а) та струмограм (б).

Система керування складається з чотирьох блоків:

**Блок 1.** Записує динамограми за декілька циклів роботи установки (рис. 3.13). Розбиває отриманий масив на окремі динамограми за даними від кінцевих давачів. На виході формується результуюча динамограма за один повний оберт кривошипа.

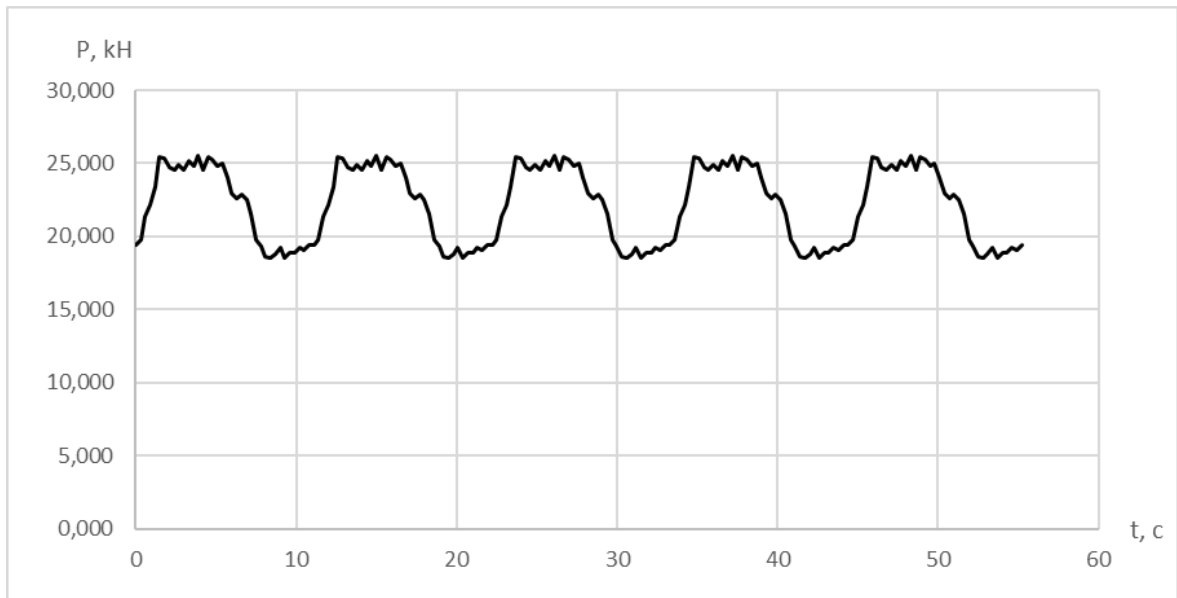


Рис. 3.13. Вхідний масив даних з тензодавача

Під час роботи схеми, показаної на рис.3.12б, поточний блок керування працює з масивом струмів (рис.3.14). Записується інформація про струм за декілька циклів роботи системи. Отриманий масив розбивається на окремі струмограми відповідно до кута повороту кривошипа. На виході формується масив із залежністю струму від кута повороту за один цикл роботи в усталеному режимі. Усталений режим визначається шляхом порівняння двох останніх струмограм.

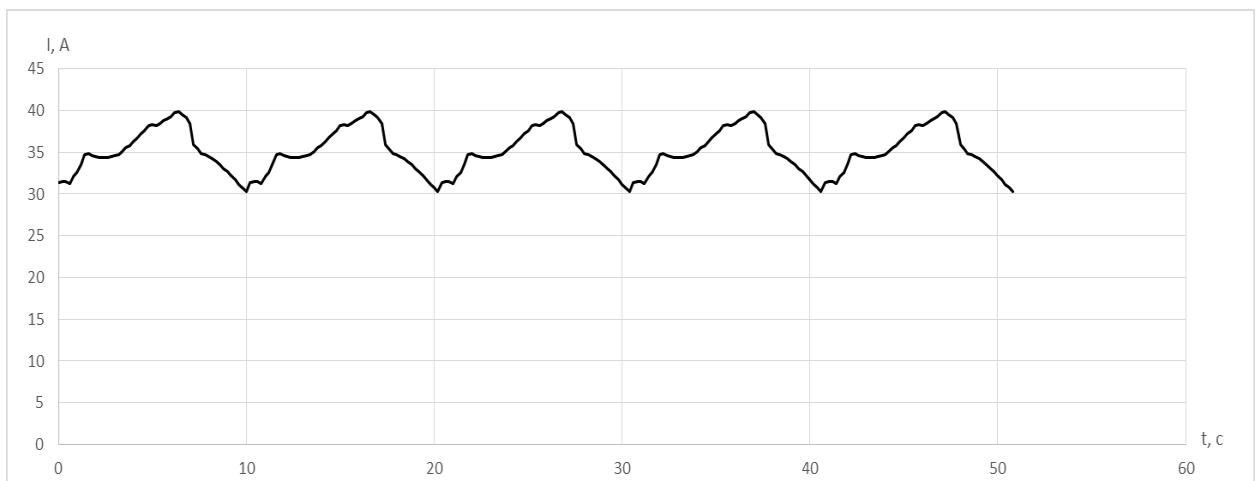


Рис. 3.14. Вхідний масив струмограм.

**Блок 2.** За розробленим в розділі 2 алгоритмом вхідний вектор записується у відносних одиницях та перетворюється в бінарну матрицю.



**Блок 3.** Нейронна мережа отримує сформоване на попередніх етапах зображення та розпізнає його. Результат розпізнавання видаються у вигляді вектора коефіцієнтів приналежності вхідного зображення до типових. Типові зображення мережа отримує при ініціалізації перед запуском моделювання.

**Блок 4.** Схема отримує від нейронної мережі вектор з інформацією про розпізнаний об'єкт та визначає коефіцієнт заповнення свердловини.

Далі здійснюємо моделювання верстата-гойдалки згідно з викладеним в п. 3.3. Ця модель служить для визначення необхідної для збалансованого за дебітом нафти швидкості обертання кривошипа. Підпрограма, що описує роботу верстата-гойдалки, трансформує динамограму в періодичну кутову залежність моменту навантаження двигуна від кута повороту кривошипа  $M_c(\alpha) = M_c(\alpha + 2\pi)$ . Остання в свою чергу є основою для використання повної моделі електроприводу ШНВУ, яка описує динаміку як верстата, так і привідного двигуна.

Модель верстата-гойдалки побудована за допомогою блоку MATLAB Function на основі кінематичної схеми (рис.3.1). В середовищі Simulink схема має вигляд, показаний на рис.3.15.

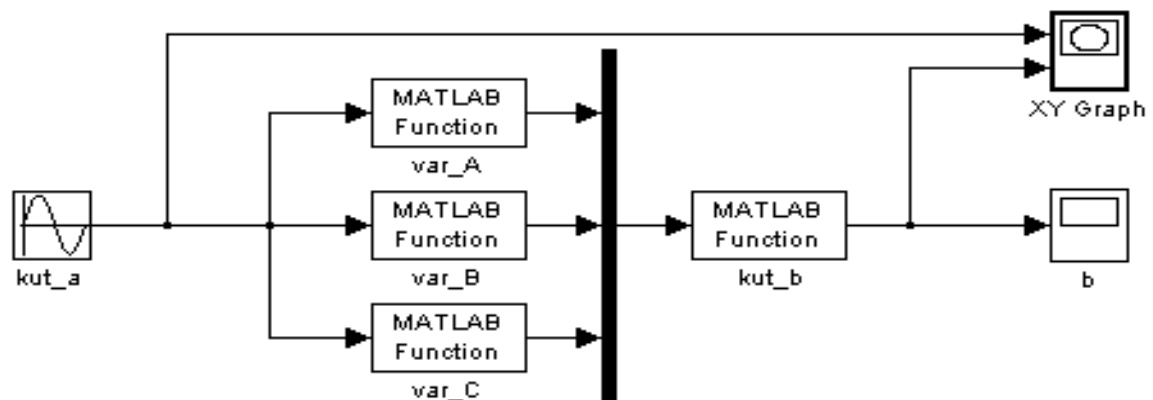
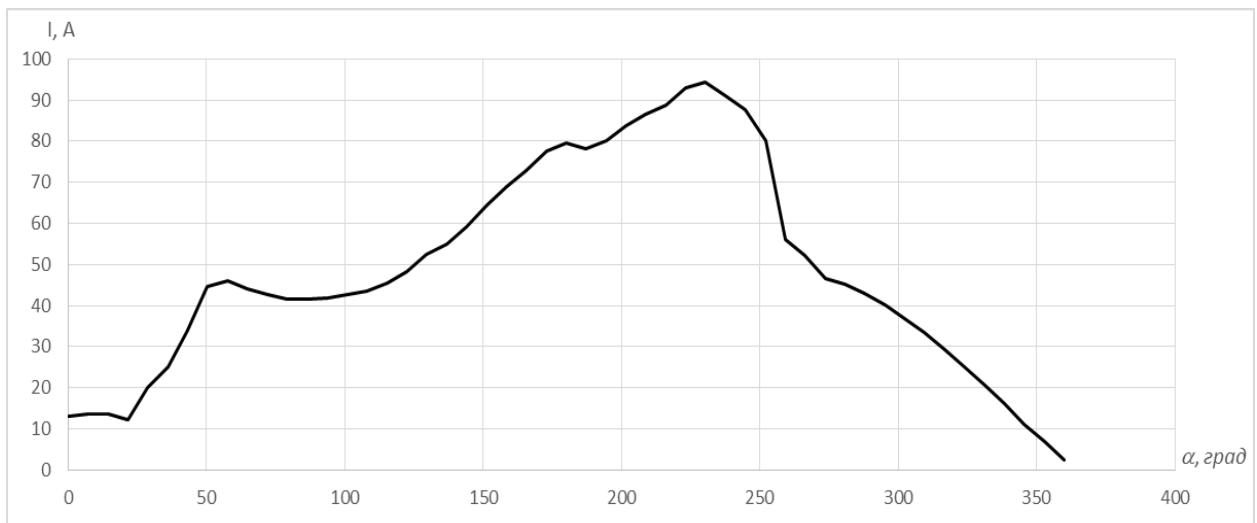


Рис.3.15. Модель механічної частини верстата-гойдалки  
в MATLAB SIMULINK

На вхід схеми подається сигнал блоку kut\_a (Sine Wave), що відповідає куту  $\alpha$  повороту кривошипа. Амплітуду синусоїди вибрано 1,04, як радіус

повороту кривошипа. В результаті отримуємо залежність кута повороту кривошипа від переміщення штока. Далі, знаючи вагу зрівноважувальних вантажів, передавальні числа редуктора і клинопасової передачі визначається момент, який є безпосередньо на валу двигуна.

Для отримання струмограм використаємо модель АД, описану в (п.3.3а). Результатом роботи моделі є струмограма, яка відповідає заданій динамограмі, яка має місце при відповідному коефіцієнті заповнення (рис.3.16).



а)

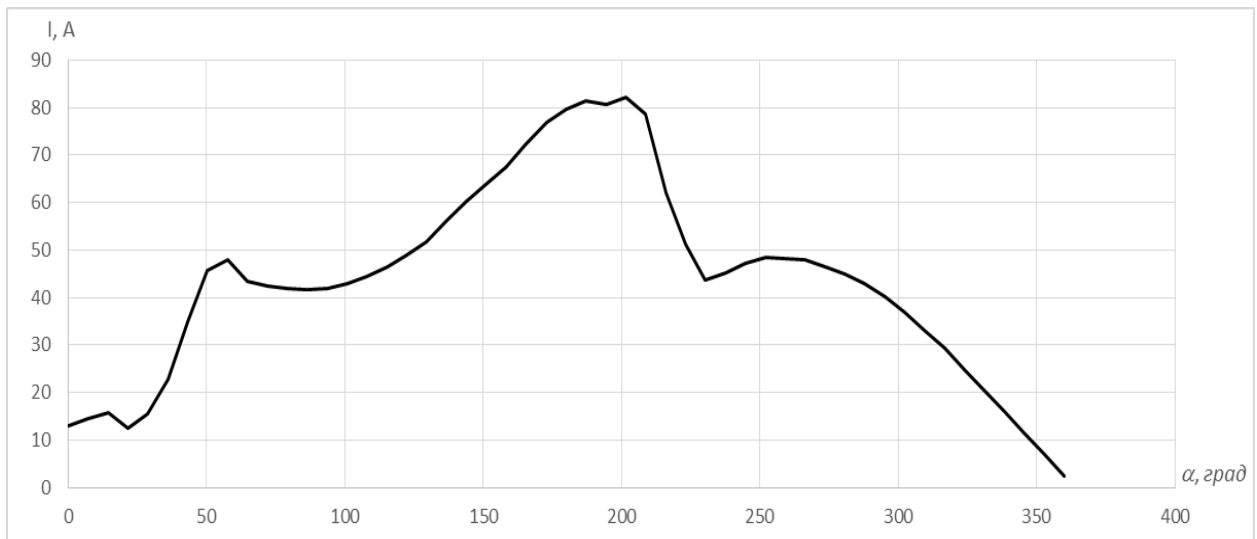


Рис. 3.16. Струмограми, які відповідають різним коефіцієнтам заповнення попи:

$k_3 = 0,75$  (а) і  $k_3 = 1$  (б).

На основі розроблених моделей силової частини, яка включає модель механічної і електричної частини ШНВУ без системи керування складено комп'ютерну модель нафтовидобувної установки. В середовищі MATLAB Simulink схема має вигляд показаний на рис.3.17:

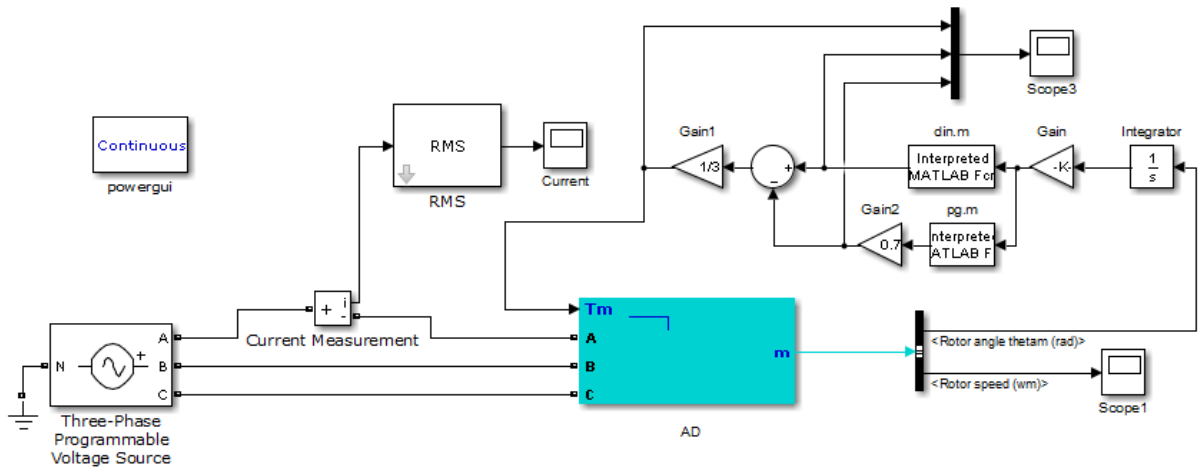


Рис. 3.17. Структурна схема моделі ШНВУ.

Наступним етапом моделювання електромеханічної системи нафтовидобувної установки є створення повної моделі ШНВУ, яка включає в себе як силову частину, так і систему керування. Схема наведена на рис 3.18.

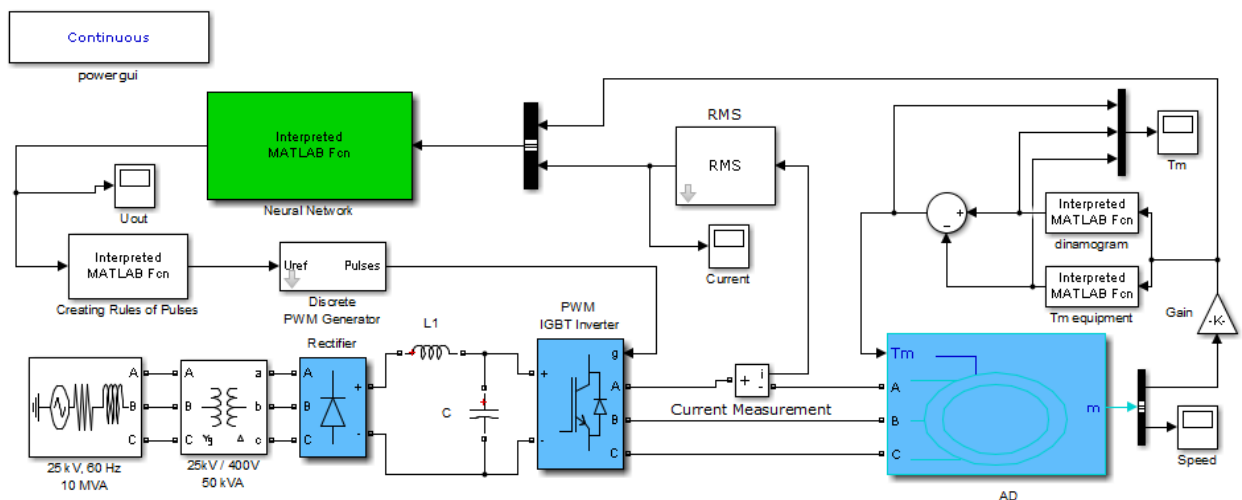


Рис.3.18. Модель ШНВУ з системою керування.

Система працює наступним чином. Інформація про струм двигуна за декілька циклів роботи системи записується в пам'ять у блоці Neural Network, блок-схема якого показана на рис.3.19.

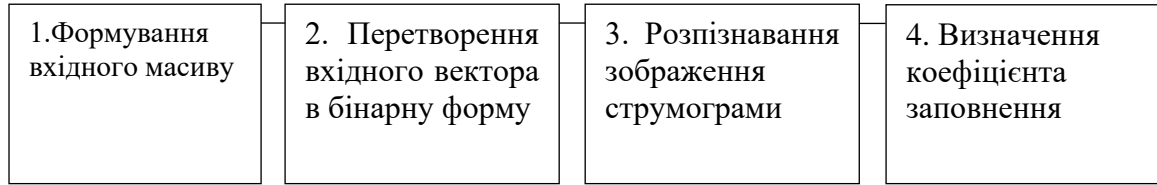


Рис.3.19. Блок-схема блоку Neural Network.

У цьому блоці отриманий масив розбивається на окремі струмограми і на виході формується масив значень струму за один оберт кривошипа в усталеному режимі. Усталений режим визначається шляхом порівняння двох останніх струмограм. Надалі за спеціальним алгоритмом вихідний масив струму записується у відносних одиницях та перетворюється в бінарну матрицю. Нейронна мережа отримує підготовлене зображення у вигляді матриці та розпізнає його. Результат розпізнавання представляється у вигляді вектора коефіцієнтів приналежності вхідного зображення до типових. Типові зображення мережа отримує при ініціалізації перед запуском системи. У результаті порівняння коефіцієнтів приналежності система керування визначає коефіцієнт заповнення свердловини та встановлює швидкість обертання АД.

Серед мереж прямого поширення вибрано перцептрон Розенблата та багатошаровий перцептрон [137]. Для них точність розпізнавання в основному залежить від налаштування вихідних реакцій перцептрона. Також розглянуто рекурентні нейронні мережі (мережу Хопфілда та її модифікацію – мережу Хемінга\*) [137]. Вони є динамічними, тому що в силу наявних зворотних зв'язків у них модифікуються входи нейронів, що призводить до зміни стану мережі. Поведінка рекурентних мереж описується диференціальними або різницеvими рівняннями, як правило, першого порядку. Це набагато розширює області застосування нейромереж і способи їх навчання.

На запропонованій схемі перевірено роботу декількох нейронних мереж щодо доцільності їх використання у системі керування глибинно-помповими установками нафтових свердловин.

В таблиці 3.1 показано точність розпізнавання нейронними мережами (у відсотках) зображень струмограм на різних наборах вхідних даних.

Таблиця 3.1.

| Тип нейронної мережі     | Елементи з навчальної вибірки | Слабо зашумлені елементи | Сильно зашумлені елементи |
|--------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Одношаровий перцептрон   | 100%                          | 50%                      | 10%                       |
| Багатошаровий перцептрон | 100%                          | 80%                      | 50%                       |
| Мережа Хопфілда          | 100%                          | 90%                      | 75%                       |
| Мережа Хемінга*          | 100%                          | 90%                      | 75%                       |

З дослідів видно, що рекурентні мережі краще справляються з задачею класифікації зображень, дають більшу кількість правильних результатів при складніших умовах експлуатації ШНВУ. Окрім того, перевірено час навчання вибраних нейронних мереж на побудованій комп'ютерній моделі. В таблицях 3.2, 3.3 наведено результати досліджень на комп'ютері та сигнальному процесорі ARM Cortex.

Таблиця 3.2.

| Тип нейронної мережі     | Час навчання 10 зображень, с | Час навчання 20 зображень, с |
|--------------------------|------------------------------|------------------------------|
| Одношаровий перцептрон   | 1,283                        | 2,400                        |
| Багатошаровий перцептрон | 4,851                        | 6,740                        |
| Мережа Хопфілда          | 0,385                        | 0,540                        |
| Мережа Хемінга*          | 0,385                        | 0,385                        |

Таблиця 3.3.

| Тип нейронної мережі     | Час навчання<br>10 зображень, с | Час навчання<br>20 зображень, с |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Одношаровий перцептрон   | 6,415                           | 11,430                          |
| Багатошаровий перцептрон | 23,520                          | 37,428                          |
| Мережа Хопфілда          | 1,425                           | 2,369                           |
| Мережа Хемінга*          | 1,425                           | 1,425                           |

З наведених результатів видно, що час навчання рекурентних нейронних мереж дає змогу використовувати їх в системах реального часу для керування ШНВУ. Щодо фізичної реалізації нейромережі, то оскільки один робочий цикл ШНВУ триває 5–15с, ресурсів недорогого мікроконтролера достатньо для реалізації системи розпізнавання стану свердловини.

Отримана модель дає змогу відтворити реальні процеси, які відбуваються в електромеханічній системі нафтовидобувної установки.

### 3.11. Моделювання робочих режимів ШНВУ

На рис.3.21-3.23 показано приклад зміни коефіцієнта заповнення помпи та відповідної середньої швидкості привідного двигуна на основі поданих на вхід системи динамограм (рис.3.20), які були зняті на експериментальному зразку системи автоматизації, що експлуатується в НГВУ “Бориславнафтогаз”.

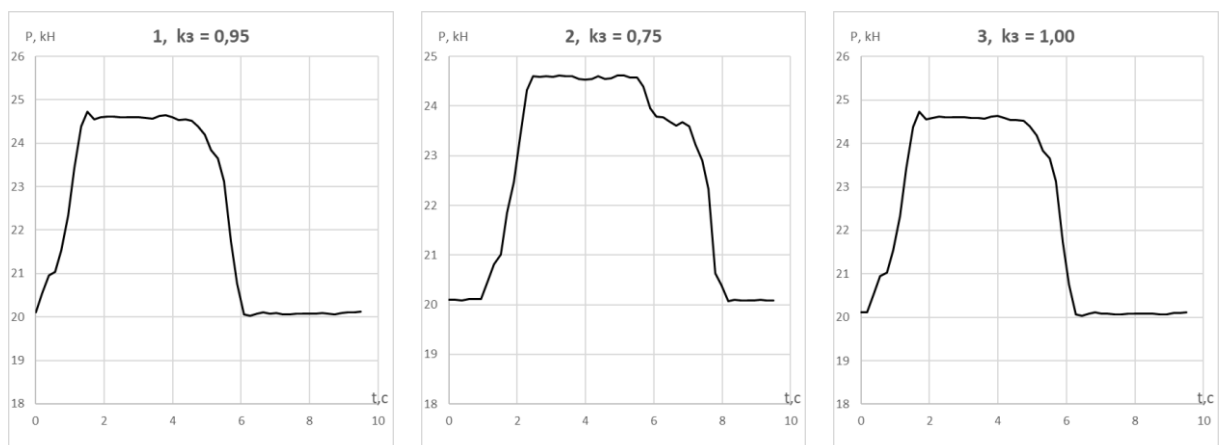


Рис. 3.20. Графіки динамограм при різних коефіцієнтах заповнення

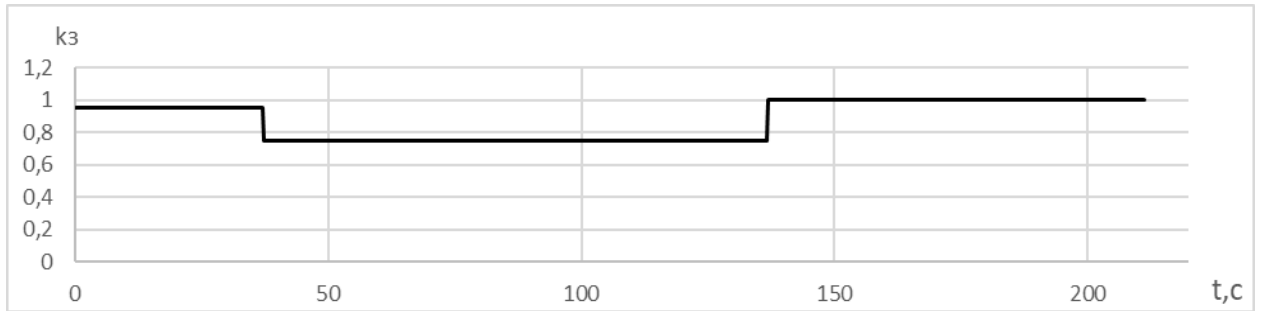


Рис. 3.21. Графік зміни коефіцієнта заповнення

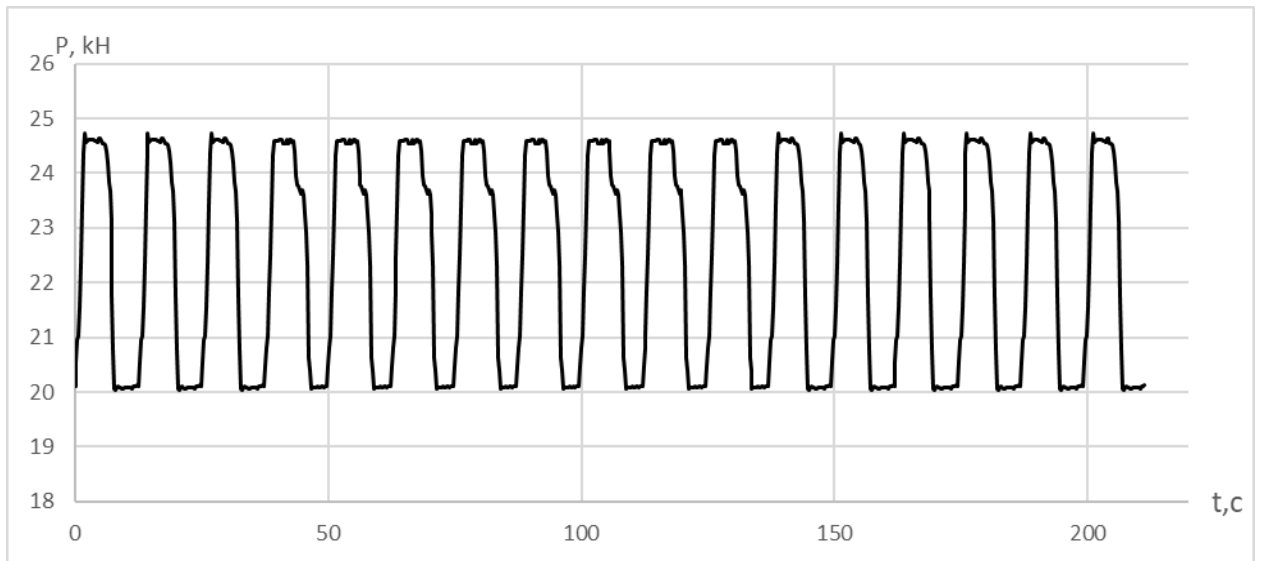


Рис. 3.22. Зміна динамограми відповідно до зміни коефіцієнта заповнення.

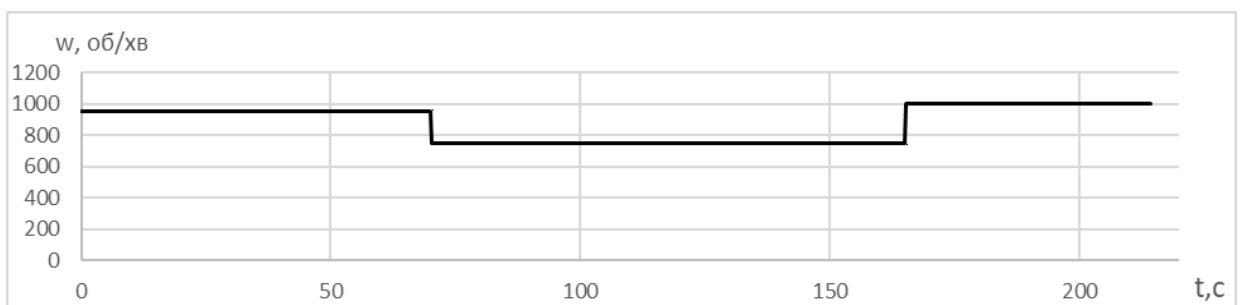
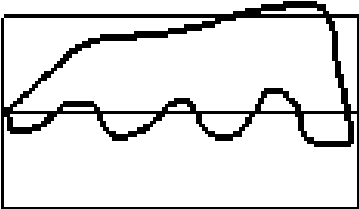






Рис. 3.23. Зміна сигналу завдання швидкості обертання двигуна.

### 3.12. Моделювання аварійних режимів ШНВУ

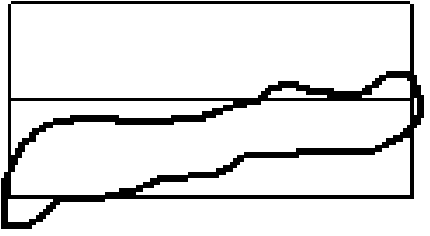

Створена в п.3.5 модель дає змогу досліджувати не тільки робочі режими, але й аварійні. До найбільш поширених відносяться аварії, які показані в таблиці 3.4. Дана таблиця створена на основі статистичних даних, отриманих з нафтовидобувних підприємств, літературних джерел та довідників [114–116].

Таблиця 3.4.

| № | АВАРІЯ   | ЙМОВІРНА ПРИЧИНА                             | МЕТОД УСУНЕННЯ  | ВИГЛЯД ДИНАМОГРАМИ  |
|---|--|--|---|---|
| 1 | Витік рідини в нагнітальній частині                          | Гідроабразивне зношення корпусу клапана      | Заміна помпи  |    |
| 2 | Витік рідини в приймальній частині                           | Гідроабразивне зношення корпусу клапана      | Заміна помпи  |   |
| 3 | Одочасний витік рідини в нагнітальній і приймальній частинах | Гідроабразивне зношення корпусу клапана      | Заміна помпи  |  |
| 4 | Витік рідини з підйомних труб                                | Розгерметизація різьби або тріщина в тркбах. | Усунути витік в трубах, замінити помпу                    |  |
| 5 | Вплив газу на роботу помпи, неповне заповнення циліндра      | Попадання рідини разом з газом в циліндр     | Застосувати газовий якір, збільшити глибину підвісу помпи |  |



Продовження Таблиці 3.4

|   |  |   |   |  |
|---|--|---|---|--|
| 6 | Висока посадка плунжера помпи          | Удар верхнього кінця плунжера по циліндрі помпи і зрив циліндра з опори | Опустити колону штанг помпи на величину запасу ходу |  |
| 7 | Заклинювання плунжера в циліндрі помпи | Попадання механічних частинок між плунжером і циліндром                 | Підняти помпу, очистити і застосувати пісочний якір |  |

Для правильного розпізнавання аварійних ситуацій створена навчальна вибірка для кожної типової аварійної ситуації для навчання нейронної мережі.

В таблиці 3.5 показано декілька зразків для навчання нейронної мережі, де за основу взято вигляд динамограми при аварії та визначена причина аварії. В такому випадку система автоматично повідомляє оператору про аварію, її причину та можливі методи усунення. Для тестування змодельовано 5 нових масивів з динамограмами при різних аварійних режимах.

Таблиця 3.5.

Динамограми для тестування нейронної мережі

| angle | Din1   | Din2   | Din3   | Din4   | Din5   |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 0     | 19,441 | 18,566 | 24,121 | 19,874 | 18,939 |
| 10    | 19,784 | 19,279 | 24,324 | 19,673 | 19,794 |
| 20    | 21,340 | 19,457 | 24,650 | 19,568 | 21,196 |
| 30    | 22,141 | 19,395 | 24,763 | 19,089 | 22,358 |
| 40    | 23,415 | 19,381 | 24,780 | 18,631 | 23,386 |
| 50    | 25,424 | 19,614 | 24,560 | 19,234 | 24,894 |
| 60    | 25,386 | 19,679 | 24,475 | 18,631 | 24,596 |
| 70    | 24,740 | 19,573 | 24,261 | 19,151 | 24,501 |
| 80    | 24,555 | 19,655 | 24,316 | 19,226 | 24,812 |
| 90    | 24,877 | 19,675 | 24,277 | 18,643 | 25,292 |
| 100   | 24,566 | 19,625 | 24,411 | 18,569 | 24,841 |
| 110   | 25,203 | 19,973 | 24,436 | 18,986 | 25,023 |

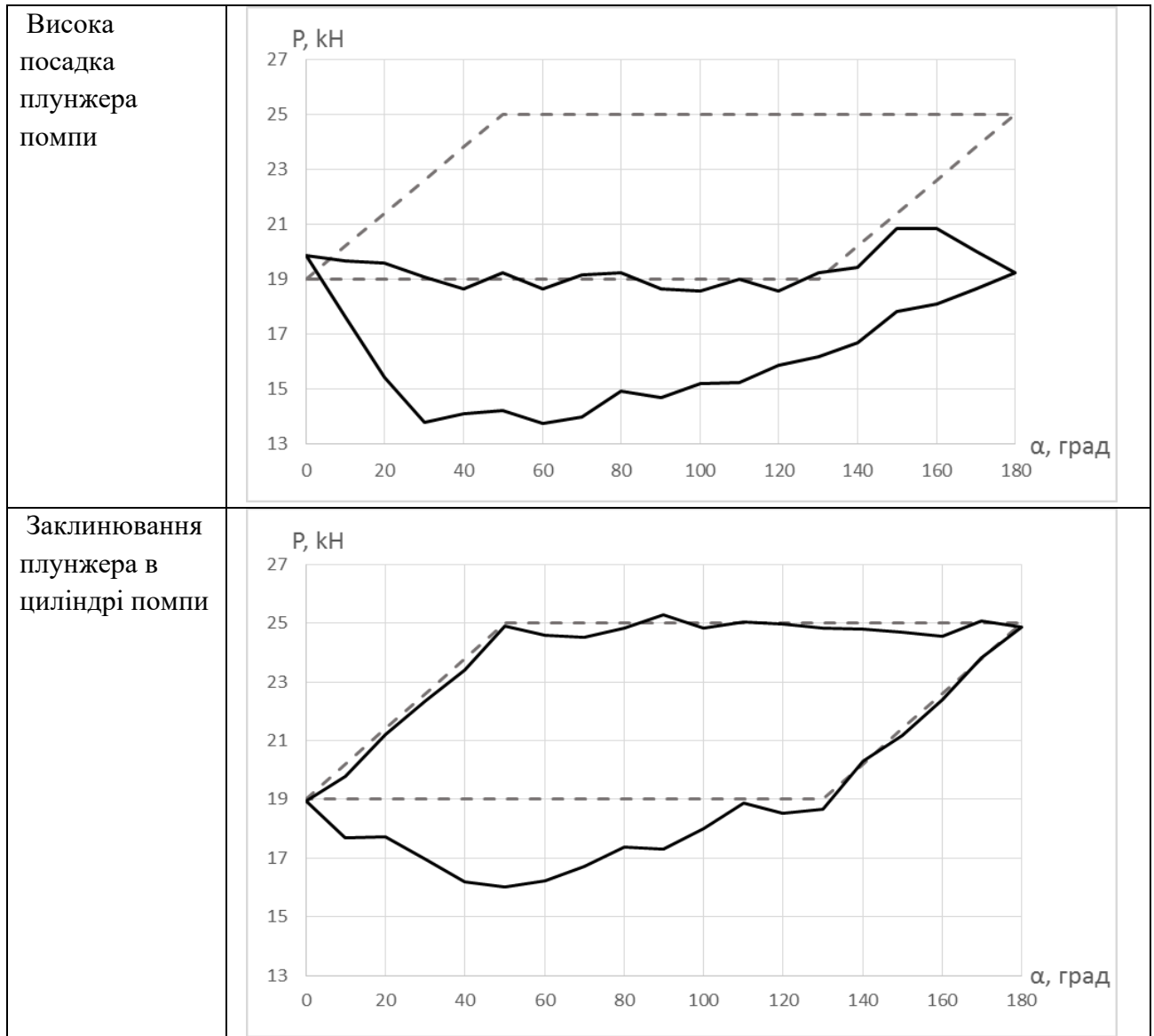
## Продовження Таблиці 3.5

|     |        |        |        |        |        |
|-----|--------|--------|--------|--------|--------|
| 120 | 24,796 | 19,360 | 24,740 | 18,562 | 24,985 |
| 130 | 25,489 | 19,842 | 24,472 | 19,214 | 24,835 |
| 140 | 24,547 | 19,590 | 24,872 | 19,433 | 24,784 |
| 150 | 25,408 | 19,853 | 24,738 | 20,850 | 24,684 |
| 160 | 25,255 | 19,961 | 24,843 | 20,833 | 24,547 |
| 170 | 24,855 | 19,777 | 24,603 | 20,028 | 25,089 |
| 180 | 24,958 | 19,520 | 24,233 | 19,212 | 24,877 |
| 170 | 23,978 | 19,268 | 24,209 | 18,631 | 23,832 |
| 160 | 22,933 | 18,815 | 24,091 | 18,110 | 22,404 |
| 150 | 22,621 | 18,981 | 23,697 | 17,837 | 21,161 |
| 140 | 22,855 | 18,974 | 23,524 | 16,698 | 20,314 |
| 130 | 22,480 | 19,142 | 23,576 | 16,194 | 18,650 |
| 120 | 21,574 | 19,002 | 24,063 | 15,867 | 18,521 |
| 110 | 19,758 | 18,763 | 23,790 | 15,250 | 18,859 |
| 100 | 19,353 | 19,233 | 24,091 | 15,214 | 17,999 |
| 90  | 18,658 | 18,539 | 23,906 | 14,691 | 17,313 |
| 80  | 18,531 | 19,008 | 23,904 | 14,930 | 17,381 |
| 70  | 18,830 | 18,780 | 24,085 | 13,991 | 16,703 |
| 60  | 19,268 | 18,986 | 23,648 | 13,741 | 16,223 |
| 50  | 18,537 | 19,020 | 23,618 | 14,206 | 16,017 |
| 40  | 18,868 | 19,082 | 24,186 | 14,086 | 16,207 |
| 30  | 18,914 | 19,057 | 23,872 | 13,785 | 16,976 |
| 20  | 19,252 | 18,511 | 23,771 | 15,419 | 17,723 |
| 10  | 19,019 | 18,532 | 23,824 | 17,610 | 17,697 |
| 0   | 19,441 | 18,566 | 24,121 | 19,874 | 18,939 |

В таблиці 3.6 наведені відповідні динамограми при аварійних режимах (для порівняння пунктирною лінією відображено ідеальні теоретичні динамограми), які побудовані на основі значень з таблиці 3.5.

## Графічне представлення динамограм для тестування нейронної мережі

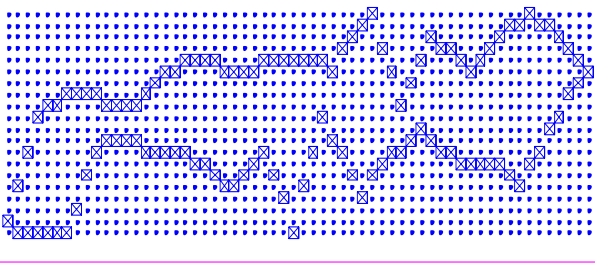
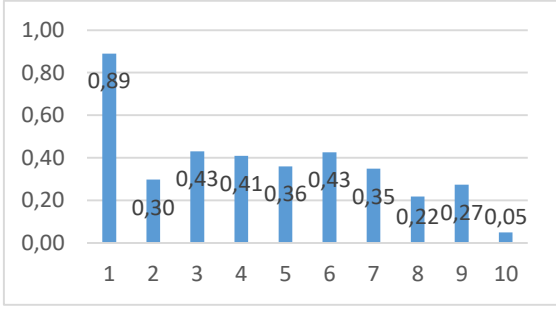
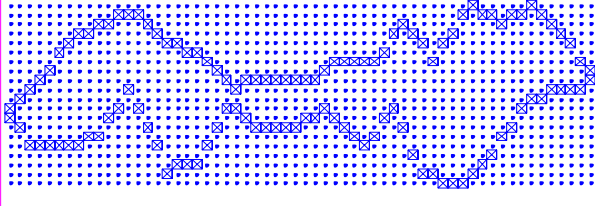
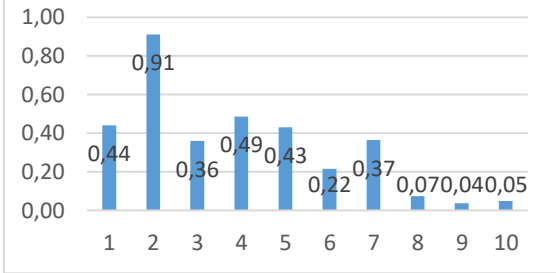
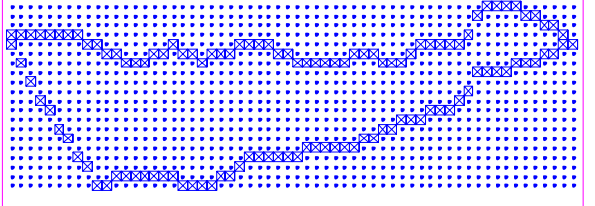
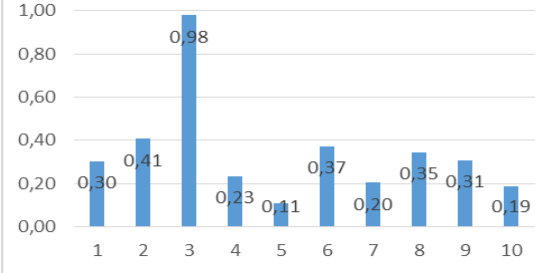
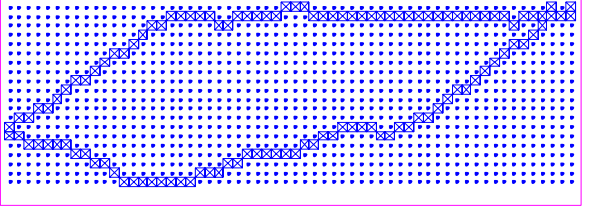
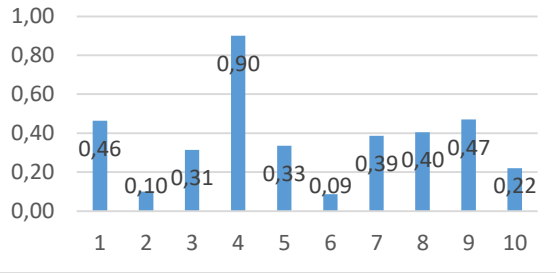
| Опис  | Динамограма  |
|---|--|
| Вплив газу на роботу помпи, неповне заповнення циліндра | <p>Динамограма показує силу <math>P</math>, кН на осі Y (від 18 до 26) проти кута <math>\alpha</math>, град на осі X (від 0 до 180). Дві лінії (сухомір і напіс) показують різні динаміки, причому верхня лінія має вищу амплітуду коливань.</p>             |
| Несправність нагнітальної частини помпи                 | <p>Динамограма показує силу <math>P</math>, кН на осі Y (від 18 до 26) проти кута <math>\alpha</math>, град на осі X (від 0 до 180). Дві лінії (сухомір і напіс) показують низьку амплітуду коливань, що свідчить про несправність нагнітальної частини.</p> |
| Несправність приймальної частини помпи                  | <p>Динамограма показує силу <math>P</math>, кН на осі Y (від 18 до 26) проти кута <math>\alpha</math>, град на осі X (від 0 до 180). Дві лінії (сухомір і напіс) показують низьку амплітуду коливань, що свідчить про несправність приймальної частини.</p>  |



Згідно з описаним в розділі 2 алгоритмом, вхідні масиви даних з таблиці 3.4 перетворюються у відносні одиниці та будується бінарна матриця. Сформований двійковий масив подається на вхід нейронної мережі, результатом роботи якої є номер класу до якого належить вхідне зображення.

В таблиці 3.7 наведено графічне представлення бінарного масиву та результат розпізнавання у вигляді гістограми належності для деяких динамограм в середовищі MATLAB.

Таблиця 3.7.

| Бінарна матриця   | Гістограма  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
|---|---|------|---------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|---|------|----|------|
|    |  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Клас</th> <th>Частота</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,89</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,30</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,43</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,41</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,36</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,43</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,35</td></tr> <tr><td>8</td><td>0,22</td></tr> <tr><td>9</td><td>0,27</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,05</td></tr> </tbody> </table>   | Клас | Частота | 1 | 0,89 | 2 | 0,30 | 3 | 0,43 | 4 | 0,41 | 5 | 0,36 | 6 | 0,43 | 7 | 0,35 | 8 | 0,22 | 9 | 0,27 | 10 | 0,05 |
| Клас  | Частота   |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 1   | 0,89  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 2   | 0,30  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 3   | 0,43  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 4   | 0,41  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 5   | 0,36  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 6   | 0,43  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 7   | 0,35  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 8   | 0,22  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 9   | 0,27  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 10  | 0,05  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
|    |  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Клас</th> <th>Частота</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,44</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,91</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,36</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,49</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,43</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,22</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>8</td><td>0,07</td></tr> <tr><td>9</td><td>0,04</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,05</td></tr> </tbody> </table>   | Клас | Частота | 1 | 0,44 | 2 | 0,91 | 3 | 0,36 | 4 | 0,49 | 5 | 0,43 | 6 | 0,22 | 7 | 0,37 | 8 | 0,07 | 9 | 0,04 | 10 | 0,05 |
| Клас  | Частота   |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 1   | 0,44  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 2   | 0,91  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 3   | 0,36  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 4   | 0,49  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 5   | 0,43  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 6   | 0,22  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 7   | 0,37  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 8   | 0,07  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 9   | 0,04  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 10  | 0,05  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
|   |  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Клас</th> <th>Частота</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,30</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,41</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,98</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,23</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,11</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,37</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,20</td></tr> <tr><td>8</td><td>0,35</td></tr> <tr><td>9</td><td>0,31</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,19</td></tr> </tbody> </table>  | Клас | Частота | 1 | 0,30 | 2 | 0,41 | 3 | 0,98 | 4 | 0,23 | 5 | 0,11 | 6 | 0,37 | 7 | 0,20 | 8 | 0,35 | 9 | 0,31 | 10 | 0,19 |
| Клас  | Частота   |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 1   | 0,30  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 2   | 0,41  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 3   | 0,98  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 4   | 0,23  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 5   | 0,11  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 6   | 0,37  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 7   | 0,20  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 8   | 0,35  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 9   | 0,31  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 10  | 0,19  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
|  |  <table border="1"> <thead> <tr> <th>Клас</th> <th>Частота</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0,46</td></tr> <tr><td>2</td><td>0,10</td></tr> <tr><td>3</td><td>0,31</td></tr> <tr><td>4</td><td>0,90</td></tr> <tr><td>5</td><td>0,33</td></tr> <tr><td>6</td><td>0,09</td></tr> <tr><td>7</td><td>0,39</td></tr> <tr><td>8</td><td>0,40</td></tr> <tr><td>9</td><td>0,47</td></tr> <tr><td>10</td><td>0,22</td></tr> </tbody> </table> | Клас | Частота | 1 | 0,46 | 2 | 0,10 | 3 | 0,31 | 4 | 0,90 | 5 | 0,33 | 6 | 0,09 | 7 | 0,39 | 8 | 0,40 | 9 | 0,47 | 10 | 0,22 |
| Клас  | Частота   |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 1   | 0,46  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 2   | 0,10  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 3   | 0,31  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 4   | 0,90  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 5   | 0,33  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 6   | 0,09  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 7   | 0,39  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 8   | 0,40  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 9   | 0,47  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |
| 10  | 0,22  |      |         |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |   |      |    |      |

Після аналізу результату розпізнавання система передає керування тому чи іншому блоку (робота з базою даних, аварійний режим роботи, штатний режим з корекцією завдання для частотного перетворювача).

Якщо нейронна мережа отримує сильно зашумлений зразок або зразок з невідомого режиму роботи, то передається керування оператору і оператор може віднести розпізнаний зразок до вже існуючого класу з навчальної вибірки

або створити новий клас. Таке рішення дає змогу в процесі роботи схеми з часом підвищити процент правильних розпізнавань зображень.

## Висновки

1. На основі нелінійних математичних моделей верстата-гойдалки й АД та використання штучних нейронних мереж для ідентифікації динамограм розроблено динамічну модель електроприводу ШНВУ, яка слугує основою для створення на сучасній математичній основі високоефективних методів і алгоритмів аналізу режимів роботи ШНВУ, які дають змогу отримувати достовірну інформацію про поведінку всієї електромеханічної системи в різних умовах роботи.

2. Розроблена математична модель дає змогу аналізувати процеси в асинхронному електроприводі ШНВУ в реальному часі і розраховувати необхідну для збалансованого щодо дебіту свердловини швидкість обертання ротора АД. Це дає змогу прогнозувати і встановлювати таку частоту напруги живлення, яка в умовах малого дебіту пласта забезпечує неперервну роботу установки з високим коефіцієнтом наповнення помпи і коефіцієнтом потужності.

3. Запропонований метод розрахунку механічних характеристик АД дає змогу здійснювати їх аналіз з урахуванням як насичення, так і витіснення струмів у стержнях ротора при різних законах регулювання напруги та частоти з метою забезпечення необхідного закону зміни електромагнітного моменту АД. Як показали розрахунки, вигляд механічних характеристик при різних частотах залежить не тільки від закону регулювання, але й від конкретної конструкції АД, зокрема форми пазів ротора.

4. Створена математична модель електромеханічної системи нафтовидобувної установки є основою "інтелектуальної" системи керування свердловиною. Програма, яка реалізує розроблений алгоритм роботи такої системи, має високу швидкодію, що дає можливість використовувати її для оперативного аналізу роботи нафтовидобувної установки і формувати керуючі

впливи, спрямовані на зміну частоти відповідно до умов роботи установки, з урахуванням обмежень по нагріванню АД моменту навантаження, струму чи потужності.

5. Проведено ряд математичних експериментів, які підтвердили ефективність роботи запропонованої модифікації нейронної мережі Хемінга щодо точності та швидкості розпізнавання вхідних масивів динамограм та струмограм.

6. На прикладі продемонстровано, що створена система керування штанговою глибиновидобувною установкою може в режимі реального часу оперативно адаптуватись до зміни режимів експлуатації свердловини в тому числі й аварійних, що дає змогу вчасно зупинити установку і не допустити пошкодження обладнання. Крім того, алгоритм роботи системи може прогнозувати роботу установки та формувати керуючі впливи на підставі отриманої у процесі роботи установки інформації.

Викладені в розділі матеріали опубліковані в роботах [9, 10, 76-78, 80-83, 86, 88, 91, 173].

## РОЗДІЛ 4

### АПАРАТНО-ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ СПРОЕКТОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ШНВУ

#### 4.1. Підготовка апаратного комплексу для роботи в схемі автоматичного керування ШНВУ

Розроблена система керування ШНВУ дає змогу в реальному часі контролювати стан свердловини, в тому числі малодобітної, та вчасно виявляти аварійні режими. Для такої системи необхідною є апаратна база, яка може забезпечити швидку обробку великої кількості даних, вести базу даних на зовнішньому носії з підтримкою сучасних файлових систем (fat32, NTFS), мати інтерфейси для зв'язку з зовнішньою периферією (USART, SPI, USB, ETHERNET). Для розробки спроектованої схеми (рис.4.1) вибрано недорогий мікропроцесор з потрібним набором периферійних пристроїв ARM Cortex M3 STM32F107 фірми ST Microelectronics [166].

Він містить наступну периферію:

- 8 багатоканальних швидкісних 12-бітних АЦП, до мільйона вимірювань в секунду, режим безперервного вимірювання.

- Двоканальний ЦАП, що вміє працювати в 8-ми і в 12-бітному режимах.

- 12-канальний контролер DMA, обслуговує до 12 запитів, має 4 рівня пріоритетів, незалежні розміри блоків даних для прийому і передачі (8, 16, 32 біт), підтримка кільцевого буфера. Передача даних в режимах пам'ять → пам'ять, пам'ять → периферія, периферія → пам'ять і периферія → периферія.

- 16-бітні таймери з довільними дільниками, які вміють генерувати переривання по переповненню, генерувати ШІМ, вимірювати довжину і число вхідних імпульсів, запускати ЦАП і навіть автоматично обробляти імпульси з енкодерів і давачів Холла.



- NVIC контролер переривань, підтримує до 20 переривань від зовнішніх джерел.

- Кілька Watchdog-таймерів для більшої надійності.

- Повна підтримка стандарту USB 2.0 Full-speed, USB OTG (On - The-Go).

Ця технологія дає змогу пов'язувати USB-пристрої без участі хоста (наприклад: цифрову камеру з принтером).

- Повноцінний Ethernet інтерфейс з MAC – рівнем.

- Шина I2S - шина цифрового зв'язку аудіо пристроїв.

- Набір стандартних інтерфейсів: USART, SPI, I2C, CAN.

Принципова схема контролера показана на рис.4.1.

Для тестування розроблено програмно-апаратний комплекс на основі комплекту відлагодження з платою OPEN107V з вибраним мікроконтролером та виведеними на роз'єми потрібними інтерфейсами.

Оскільки схема керування розробляється для частотно-керованого асинхронного електроприводу, то стоїть задача автоматичного керування частотним перетворювачем (рис.4.2).

Для випробувань розроблених алгоритмів роботи взято частотний перетворювач фірми Schneider Electric ATV32H018M2, який належить до сімейства Altivar 32.

Керування перетворювачем частоти можна здійснювати з вбудованої виносної цифрової панелі керування або за допомогою зовнішніх сигналів. У другому випадку швидкість обертання задається аналоговим сигналом 0–10В або 4–20мА, а команди пуску, зупинки й зміни режимів обертання подаються дискретними сигналами. Можна відображати параметри системи у вигляді графіків на виносній графічній панелі керування.

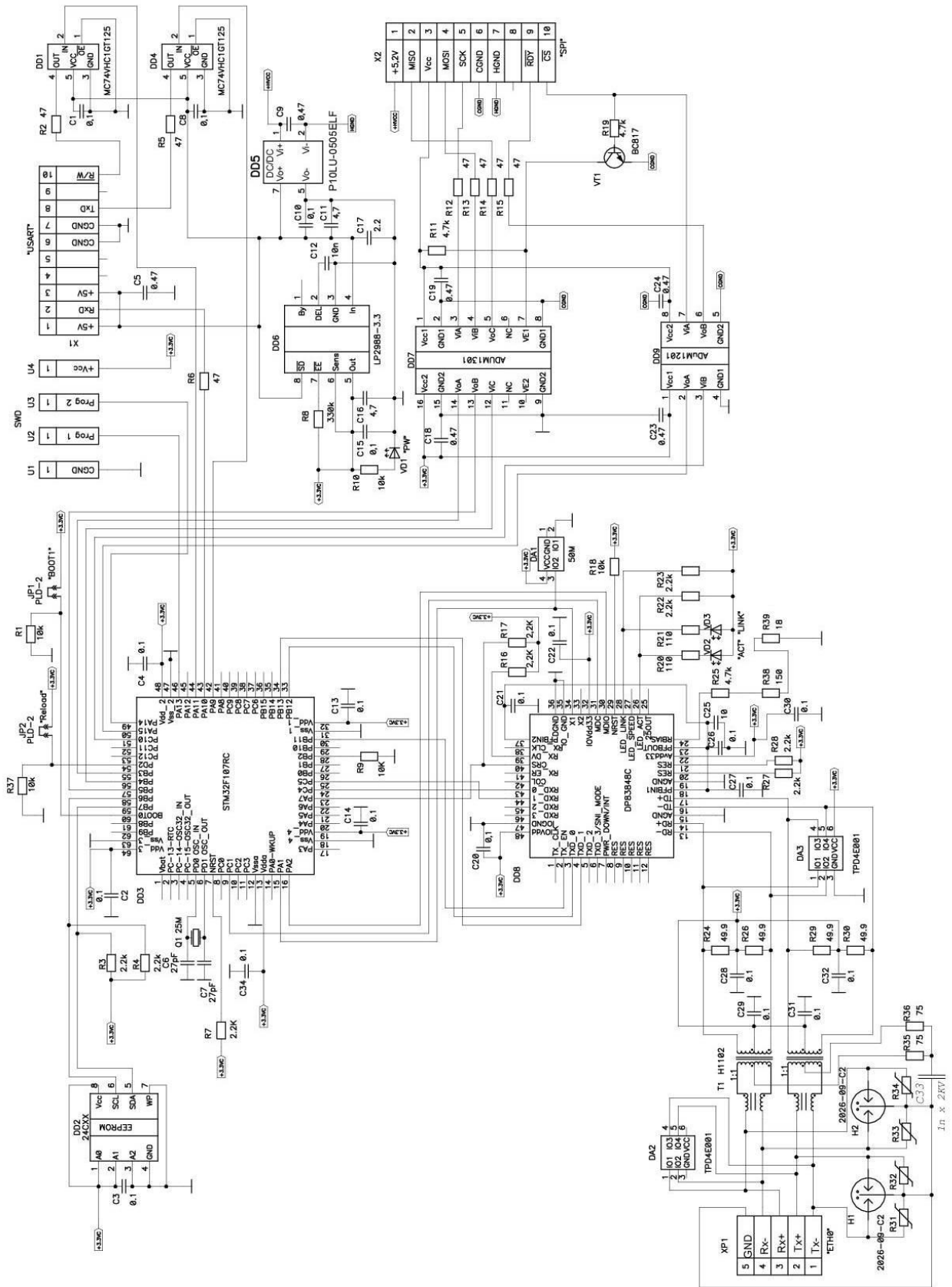


Рис. 4.1. Принципова схема установки на базі мікроконтролера STM32F107.

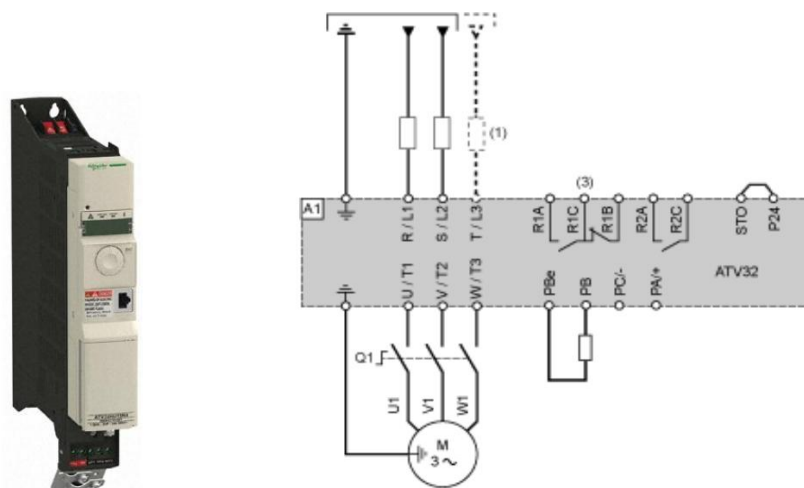


Рис. 4.2. Зовнішній вигляд частотного перетворювача ATV32H018M2 та схема підключення.

Існує можливість керування перетворювачем частоти через послідовний інтерфейс (RS-232, RS-422 або RS-485) з використанням одного зі спеціальних протоколу (Profibus, Interbus, Device-net, Modbus тощо). Оскільки серед запропонованих протоколів у відкритому доступі знаходиться тільки Modbus/CANopen, то вибрано саме його реалізацію на основі промислового інтерфейсу RS-485.

Для апаратного підключення мікроконтролера до частотного перетворювача задіяно послідовний інтерфейс USART, загальний вигляд якого зображений на рис. 4.3.



Рис. 4.3. Плата перетворювача інтерфейсів USART – RS485 з гальванічною розв'язкою та грозозахистом.

Для узгодження рівнів вибрано мікросхему ADM3287 з вбудованим DC/DC перетворювачем та можливістю роботи з RS232 та RS485 інтерфейсами. Принципова схема показана на рис. 4.4.

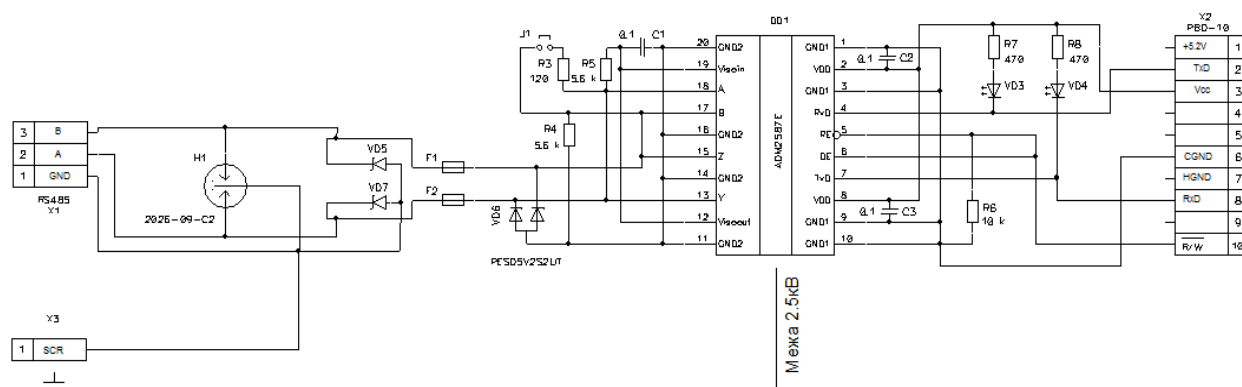


Рис. 4.4. Принципова схема перетворювача інтерфейсів USART – RS485.

При динамометруванні на верстат-гойдалку встановлюють тензодавач, а для фіксації верхнього та нижнього положень балансира верстата-гойдалки на кривошип встановлюють кінцеві давачі.

Інформація з кінцевих давачів зчитується з допомогою їх прямого під'єднання до мікроконтролера (для більш надійного захисту сигналу використовують оптопари). Інформаційний вихід тензодавача під'єднується до входу 12-бітного АЦП мікроконтролера.

В схемі, де аналізуються струмограми, інформація про струм зчитується з частотного перетворювача і приймається по протоколу MODBUS через реалізований вище зв'язок RS-485.

Для безпроводного зв'язку з сервером, як оптимальний варіант за критеріями ціна - швидкодія – дальність передачі даних прийнято рішення використовувати радіоканал на основі GSM.

GSM термінал (GSM модем) – бездротовий модем, який працює з GSM мережами. GSM термінал забезпечує передачу даних з будь-якої точки земної кулі охопленої GSM-мережею. Сьогодні це більше 80% території заселеної людьми.

GSM термінал може бути зовнішнім пристроєм або пристроєм карти PCMCIA (PC Card). Зовнішній GSM термінал за звичай підключаються до пристрою керування через COM порт (інтерфейс RS-232) або USB (віртуальний COM порт). Для реалізації бездротового зв'язку GSM модем, також як і мобільний телефон, вимагає SIM карту. Так само як і dial-up модеми, GSM модеми підтримують загальний набір AT команд, але крім цього, вони підтримують розширений набір AT команд. Ці додаткові команди визначені стандартом GSM, вони дають змогу читати, писати і відправляти SMS повідомлення, моніторити сигнал та рівень заряду акумулятора, читати, писати і шукати записи телефонної книги.

Базові AT команди для задіяного модема Siemens M60 показані в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

| AT-команда в кодуванні ASCII | Опис команди   |
|------------------------------|--|
| AT                           | Перевірка зв'язку по RS-232  |
| ATA                          | Відповідь на дзвінок   |
| ATD+380934424179             | Набрати номер для передачі даних   |
| ATD+380934424179;            | Набрати номер для аудіо зв'язку  |
| ATE1/ATE0                    | Включення/відключення режиму ехо   |
| ATH                          | Закінчити виклик (роз'єднатись)  |
| +++                          | Перехід з режиму передачі даних в командний режим без розриву зв'язку.   |
| ATS0?                        | Режим автовідповіді  |
| ATS0=2                       | Автовідповідь після двох гудків  |
| AT+CPIN?                     | Перевірка пін коду   |
| AT+CPIN=0000                 | Ввести пін код   |
| AT+COPS?                     | Оператор   |
| ATD*111#;                    | Баланс рахунку   |
| AT+CSQ                       | Рівень сигналу:<br>0 -113dBm<br>1 -111dBm<br>30 -109-53dBm<br>31 -513dBm<br>99 -not dBm  |
| AT+CPAS                      | Перевірка з'єднання:<br>+CPAS: 0-ready,3-ring,4-call OK  |
| AT+IPR=9600                  | at+ipr=?<br>+IPR:<br>(1200,2400,4800,9600,19200,38400,57600,115200),(0,300,600,1200,2400,4800,9600,14400,19200,28800,38400,57600,115200) |

Для підключення GSM-модему до мікроконтролера задіяно ще один USART інтерфейс з вже розробленим перетворювачем рівня сигналу.

Щоб мати енергонезалежну пам'ять використано додаткову мікросхему пам'яті EEPROM. Такі мікросхеми дозволяють оперативно зчитувати і записувати інформацію (8-ми бітні масиви) по інтерфейсу I2C.

## **4.2. Програмна реалізація схеми керування ШНВУ**

Для мікроконтролерів фірми STMicroelectronics розроблена бібліотека стандартної периферії. Крім того, створено безліч прикладів використання даних драйверів, що зводить написання нової програми до копіювання готових модулів з подальшою невеликою правкою скопійованого прикладу під свої потреби. Таким чином, підключення бібліотеки драйверів периферії до власного проекту спрощує написання програми. Крім легкості написання є й інші переваги цього методу: універсальність коду і застосування інших фірмових бібліотек, таких як USB, Ethernet, керування приводом і т.д., які надаються в відкритому доступі і використовують стандартні драйвери периферії. Недоліки цього методу теж є: там де можна обійтися одним рядком коду стандартний драйвер периферії STM32 напише до 10 рядків.

Сама бібліотека периферії також надається у вигляді вихідних файлів, так що можна простежити, як та чи інша функція змінює біти конкретного регістра.

Оскільки Cortex-M3 має величезну обчислювальну потужність, то доцільно для побудови систем керування на його основі використовувати операційні системи реального часу RTOS [175], що спрощує роботу з багаторівневими складними програмами. Використання RTOS також надає структурний вигляд коду, що дає змогу використовувати мови високого рівня.

Для ARM Cortex доступно більше RTOS, ніж для інших ЦПУ. Наявність ОС freeRTOS в проєкті задіює близько 9.8 Кб пам'яті під програму і 1.8 Кб ОЗУ.

Основні характеристики freeRTOS:

1. Планувальник підтримує 3 типи багатозадачності:
  - витісняючу;
  - кооперативну;
  - гібридну.
2. Розмір ядра складає 9,8 Кб в скомпільованому вигляді для stm32.
3. Підтримує завдання і підпрограми.
4. Є можливість відстежувати переповнення стека.
5. Немає програмних обмежень на кількість одночасно виконуваних завдань.
6. Немає обмеження на кількість пріоритетів завдань.
7. Кільком задачам може бути призначений однаковий пріоритет.
8. Розвинені засоби синхронізації “завдання – завдання” і ”завдання – переривання”:

  - черги;
  - виконавчі семафори;
  - рахункові семафори;
  - рекурсивні семафори;
  - м'ютекси.

9. М'ютекси з успадкуванням пріоритету.
10. Підтримка модуля захисту пам'яті для Cortex-M3.
11. Поставляється в налагодженому вигляді з демо-проєктами для різних платформ і компіляторів.
12. Безкоштовна. Можна використовувати у проєктах без розкриття початкового коду відповідно з розширеною ліцензією GPL.

Витісняюча багатозадачність означає, що виконання завдання з низьким пріоритетом перекривається завданням з більш високим пріоритетом.

Перемикання між завданнями відбувається через рівні кванти часу. Тому перш ніж високопріоритетна задача почне виконання, повинен закінчитися поточний квант часу, що викликаний низькопріоритетною.

Таким чином, час реакції FreeRTOS на зовнішні події в режимі, що витісняє багатозадачності - не більше одного кванта часу планувальника, який можна задавати в налаштуваннях. За замовчуванням він дорівнює 1 мс.

Якщо готові до виконання кілька завдань з однаковим пріоритетом, то в такому випадку планувальник виділяє кожній з них по одному кванту часу, після закінчення якого керування отримує наступне завдання з таким же пріоритетом і так далі по колу.

Кооперативна багатозадачність відрізняється від витісняючої тим, що планувальник самостійно не може перервати виконання поточного завдання. Кожна задача повинна самостійно передати керування планувальнику. Таким чином, високопріоритетна задача буде очікувати, поки низькопріоритетна завершить свою роботу і передасть керування планувальнику. Час реакції системи на зовнішню подію стає невизначеним і залежить від того, як довго поточна задача буде виконуватися до передачі керування. Кооперативна багатозадачність застосовувалася в сімействі ОС Windows.

Витісняюча і кооперативна концепції багатозадачності об'єднуються разом в гібридній багатозадачності, коли виклик планувальника відбувається кожний квант часу, але, на відміну від витісняючої багатозадачності, програміст має можливість зробити це примусово в тілі завдання. Цей режим особливо корисний коли необхідно скоротити час реакції системи на переривання. Припустимо, в поточний момент виконується низькопріоритетна задача, а високопріоритетна очікує настання деякого переривання. Далі відбувається переривання, але по закінченні роботи обробника переривань виконання повертається до поточної фоновій задачі, а високопріоритетна очікує поки закінчиться поточний квант часу. Однак, якщо після виконання обробника переривання передати керування планувальнику, то він переключиться на



високопріоритетну задачу, що дасть змогу скоротити час реакції системи на зовнішню подію.

Розпочати розробку мікроконтролерної системи, що працює під керуванням FreeRTOS, можна із завантаження її останньої версії.

Дистрибутив FreeRTOS доступний у вигляді ZIP-архіву. Він містить безпосередньо код ядра (у вигляді декількох заголовків файлів і файлів з вихідним кодом) і демонстраційні проекти (по одному проекту на середовище розробки для кожного порту).

Незважаючи на досить велику кількість файлів в архіві, структура каталогів є простою (рис.4.5).

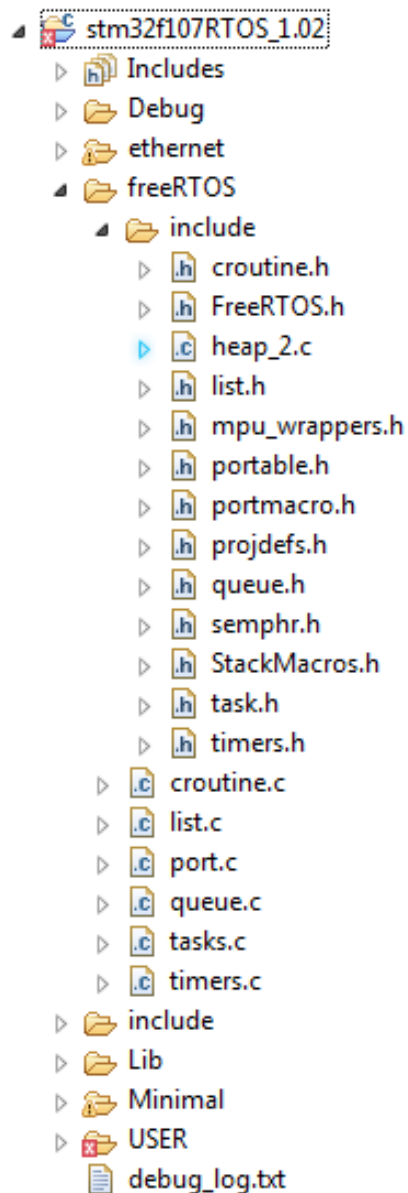


Рис. 4.5. Складений проект з операційною системою FreeRTOS

Весь вихідний код ядра знаходиться в каталозі /Source:

1. tasks.c - реалізація механізму завдань, планувальник;
2. queue.c - реалізація черг;
3. list.c - внутрішні потреби планувальника, проте функції можуть використовуватися і в прикладних програмах;
4. croutine.c - реалізація підпрограми.

Заголовки, які знаходяться в директорії source/include

1. tasks.h, queue.h, tist.h, croutine.h - заголовки для відповідних однойменних файлів з с-кодом.
2. FreeRTOS.h - містить підпроцесорні директиви для налаштування компіляції.
3. mpu\_wrappers.h - містить перевизначення функцій програмного інтерфейсу (API - функцій) FreeRTOS для підтримки модуля захисту пам'яті (MPU).
4. portable.h - платформозалежні налаштування;
5. projdefs.h - деякі системні визначення;
6. semphr.h - визначає API - функції для роботи з семафора, які реалізовані на основі черг;
7. StackMacros.h - містить макроси для контролю переповнення стека. Кожна апаратна платформа вимагає невеликої частини коду ядра, яка реалізує взаємодію з FreeRTOS. Весь платформо-залежний код знаходиться в піддиректорії /Source/Portable, де його систематизовано під різні середовища розробки (IAR, GCC і т.д.).

Окремо слід виділити піддиректорію /Source/Portable/MemMang, в якій містяться файли heap\_1.c, heap\_2.c, heap\_3.c, що реалізують 3 різних механізми виділення пам'яті для потреб FreeRTOS.

Щоб використовувати FreeRTOS у проекті, необхідно включити в нього файли вихідного коду ядра і супутні заголовні файли.

Нами використано порт для мікроконтролерів STM32 і GCC-компілятор, тому для створення проекту потрібними є піддиректорії /Source/Portable/GCC/STM32\_GCC та /Source/Portable/MemMang. Всі інші піддиректорії з директорії /Source/Portable непотрібні і можуть бути видалені.

Файл FreeRTOS Config.h містить визначення (#define), що дають змогу провести налаштування ядра FreeRTOS:

1. Набір системних функцій.
2. Використання підпрограм.
3. Кількість пріоритетів завдань і підпрограм.
4. Розміри пам'яті.
5. Тактова частота МК.
6. Період роботи планувальника часу, що виділяється кожному завданню виконання.

Основний текст програми (main) складається з підпрограм, що запускають ініціалізацію зовнішньої периферії та задач, що виконуються безперервно в замкнутому циклі. Ці задачі передані на керування диспетчеру завдань. Також згідно вимог FreeRTOS є декілька задач для відлагодження проекту та виводу проміжної інформації.

В проекті задіяно стандартну бібліотеку STM32F10x Standard Peripheral Library v3.5.0, а також бібліотеки для роботи з графічним дисплеєм, USART, АЦП, I2C та для роботи з зовнішньою пам'яттю EEPROM, яка призначена для зберігання налаштувань системи, в тому числі й масиву значень вагових коефіцієнтів нейронної мережі після навчання. Таке рішення дозволяє продовжити роботу схеми після енергозбоїв та тимчасових відключень.

Для роботи із зовнішніми інтерфейсами включено контролер DMA. Завдяки цьому дані можуть бути швидко переміщені без участі ЦПУ, що заощадить його ресурси для інших операцій (рис.4.6).

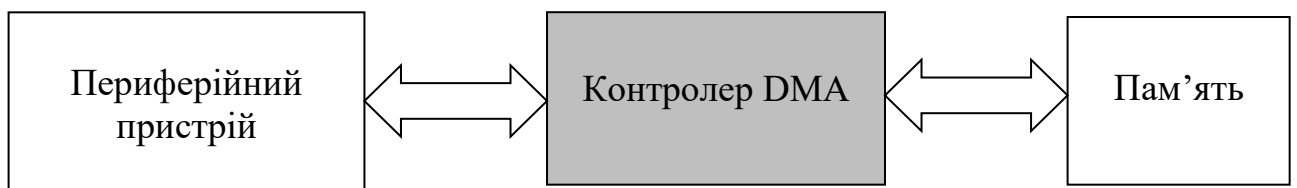


Рис. 4.6. Блок схема DMA каналу

Далі проходить ініціалізація контролера DMA, де передається вказівник на початок масиву з даними та вказується його розмір. Після завершення обміну контролер DMA передає інформацію центральному процесору про успішний кінець операції.

В STM32F107 є два незалежних контролера DMA - DMA1 і DMA2. Кожен з них має декілька незалежних каналів: DMA1 містить 7 каналів, а DMA2 - 5 каналів. До кожного каналу можна підключити один з периферійних пристроїв, закріплених за цим каналом (рис. 4.7).

Наприклад, регістр передачі даних модуля USART1 підключений до каналу № 4, а регістр прийому даних до каналу № 5.

Також, до цих каналів підключено іншу периферію (за четвертим каналом закріплена наступна периферія TIM1\_CH4, TIM1\_TRIG, TIM1\_COM, TIM4\_CH2, SPI/I2S2\_RX, I2C2\_TX).

Процес налаштування в STM32 контролера DMA використовує стандартну бібліотеку з файлами `stm32f10x_dma.h` і `stm32f10x_dma.c`. Така система дає змогу з високою швидкістю відпрацьовувати переривання на зовнішні події. Без суттєвих затримок проводиться опитування клавіатури, робота з графічним дисплеєм та ін.

Для роботи з перетворювачем частоти використано відповідне програмне забезпечення SoMachine. Цей програмний продукт дає змогу налаштувати та вводити в експлуатацію обладнання фірми Schneider Electric в одному середовищі.

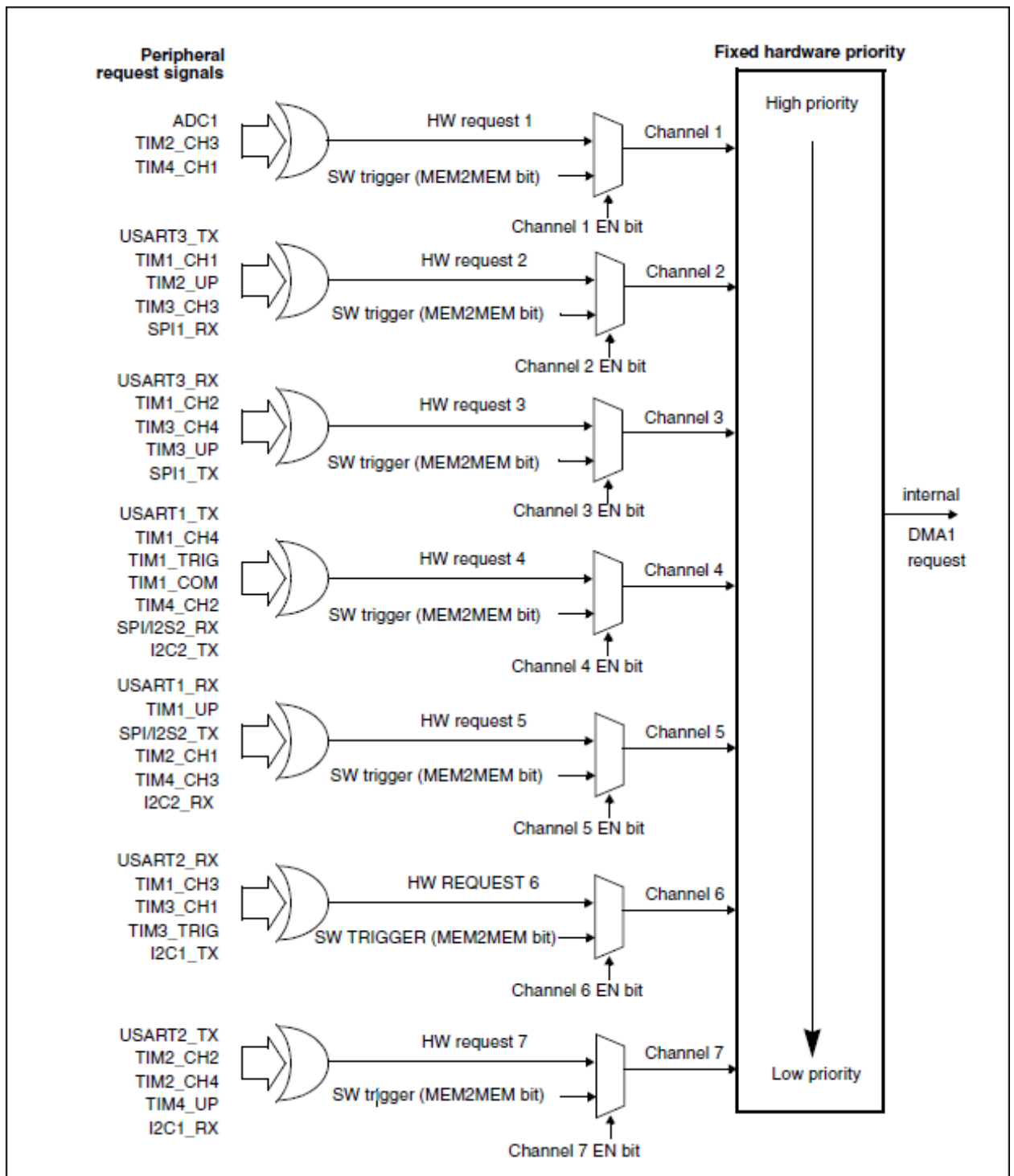


Схема шини даних DMA1

Рис. 4.7а. Периферія, що під'єднана до каналу DMA1.

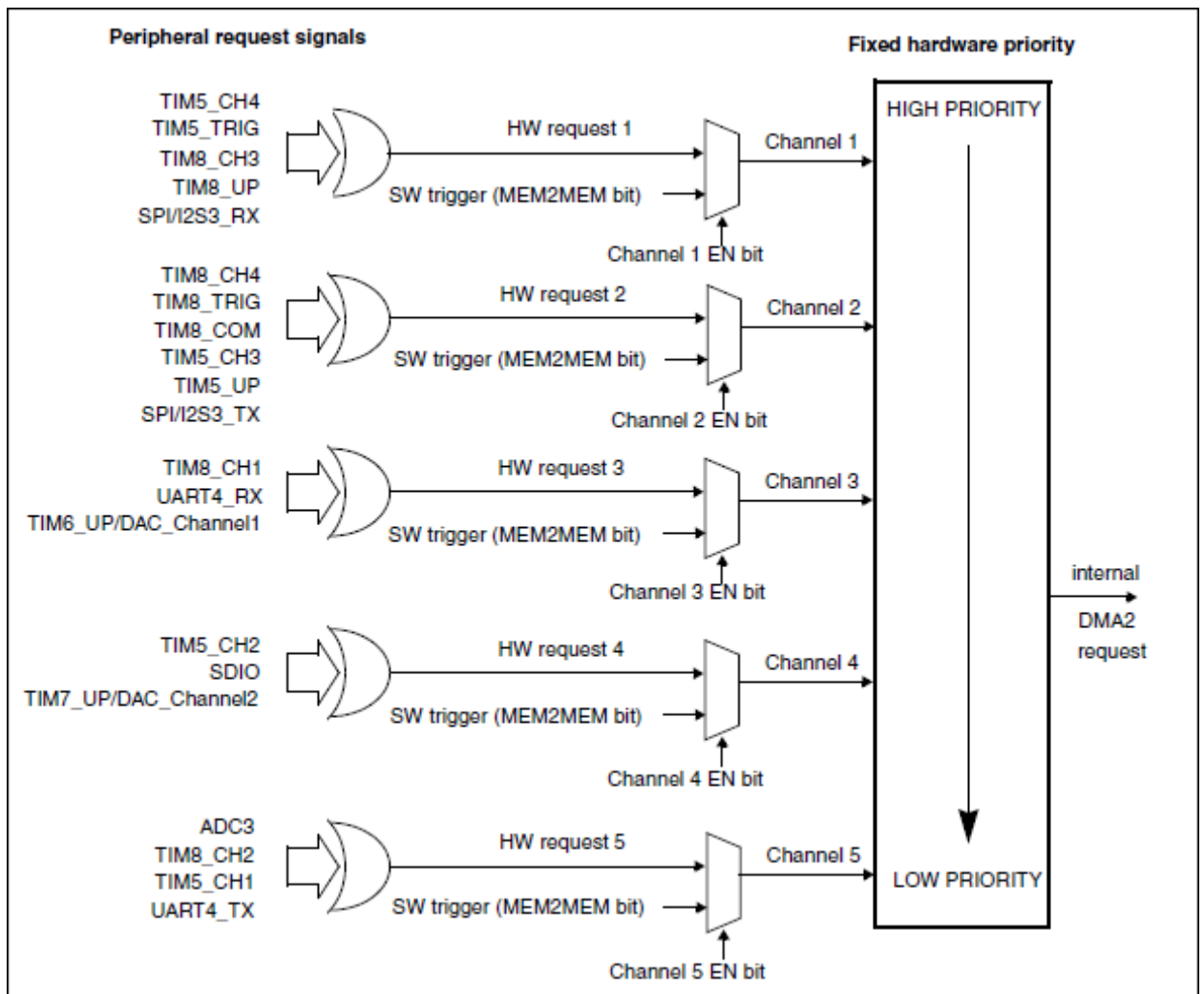


Схема шини даних DMA2

Рис. 4.76. Периферія, що під'єднана до каналу DMA2.

### 4.3. Моделювання навантаження

Для формування моменту навантаження асинхронного двигуна, який керується частотним перетворювачем зібрано типовий стенд двигун-генератор. В ролі генератора використано машину постійного струму. Особливістю конструкції є спеціальна схема формування навантаження для генератора. Навантаження формується таким чином, що може імітувати процеси, які відбуваються в нафтовидобувній установці.

Схема силової частини дослідного стенду показана на рис.4.8.

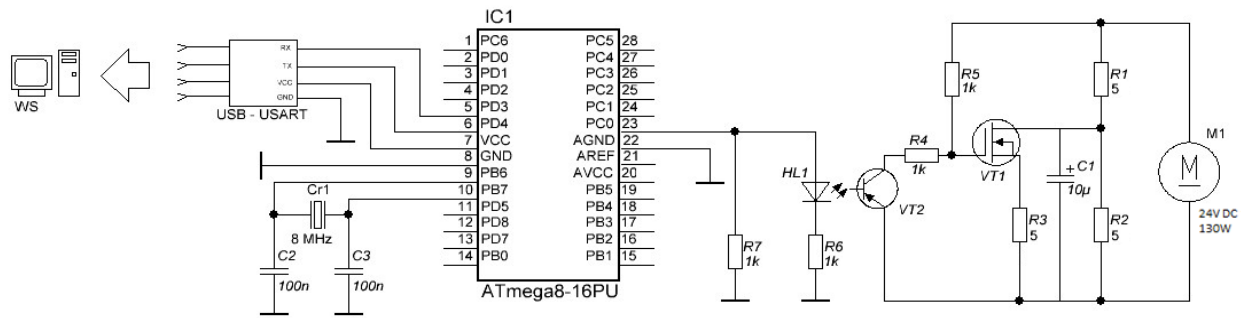


Рис. 4.8. Схема формування навантаження.

Принцип роботи схеми базується на ШІМ, реалізованій на мікроконтролері ATmega8. Для гальванічної розв'язки силової частини і частини керування використано оптопару HL1-VT2. Ключовим елементом силової схеми є польовий транзистор VT1, який комутує резистор R3, що дозволяє змінювати струм в електричному колі з двигуном. В мікроконтролері ініціалізовано інтерфейс USART і через конвертор USART-USB реалізований зв'язок з комп'ютером.

Дана схема дозволяє регулювати струм в межах 70-100% від номінального, що задовольняє умовам експлуатації нафтовидобувного обладнання.

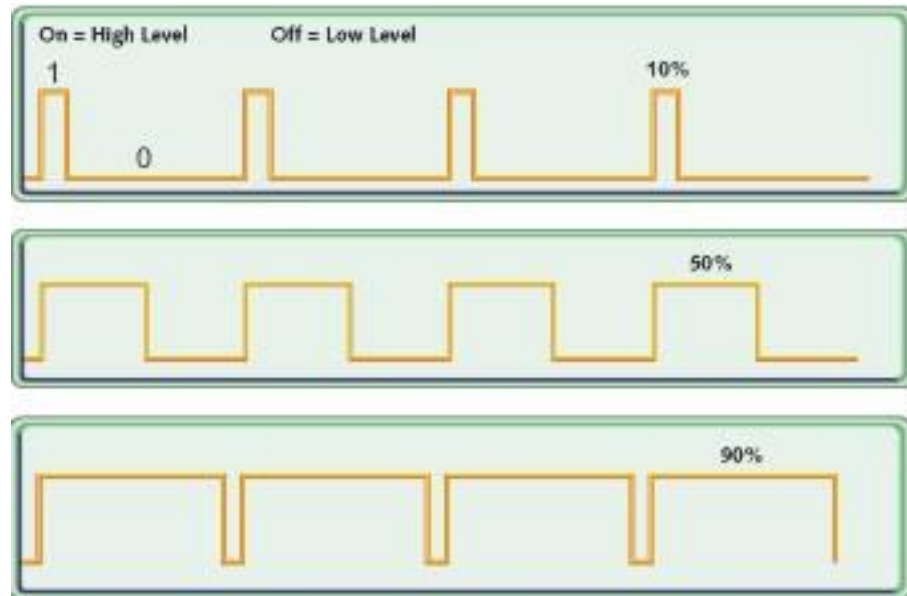
В середовищі MATLAB складена програма, яка зчитує з файлу наперед задану динамограму у вигляді масиву значень. Перетворює значення елементів масиву в процентні співвідношення і передає ці значення в віртуальний COM порт з заданою частотою. Ця частота залежить від сигналу завдання на частотний перетворювач. Зв'язок частотного перетворювача з комп'ютером реалізований через описану вище плату OPEN107 та перетворювач інтерфейсів USART-USB. Мікропроцесор Atmega8 отримавши значення статичного навантаження встановлює ширину імпульсів ШІМ.

Ключовими в складеній програмі є підпрограми зчитування вхідного масиву, підпрограма ініціалізації віртуальних COM портів для зв'язку з платою OPEN107 та платою формування навантаження генератора, підпрограма розрахунку часових затримок між відправками завдання на ШІМ.

Осцилограма ШІМ за декілька періодів роботи показана на рис.4.9.



а)



б)

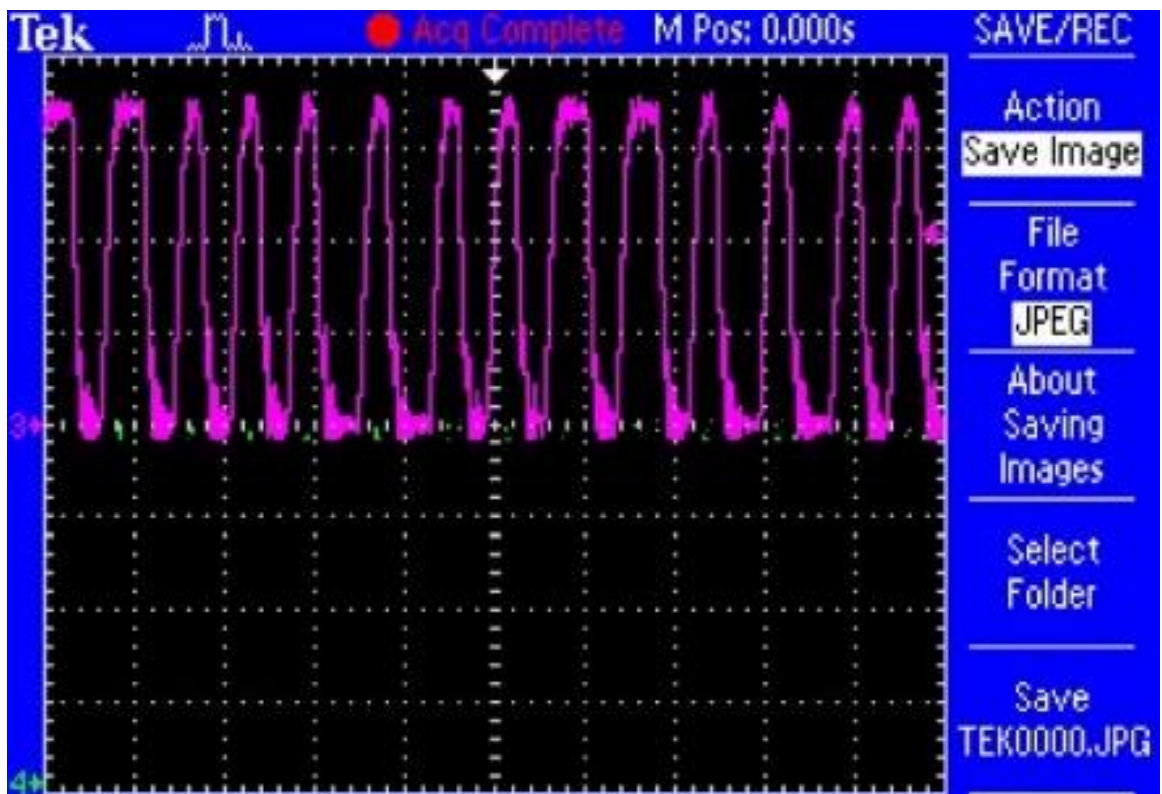
Рис. 4.9. Осцилограма ШІМ: а) фото з експериментального стенда, б) графік після комп'ютерної обробки

На рис. 4.10 показано сформовану криву навантаження за допомогою зібраного стенду.





а)



б)

Рис.4.10. Крива навантаження а) за один період та б) за декілька періодів.

#### 4.4. Запуск розробленої схеми та результати досліджень

**4.4.1. Перший запуск та ініціалізація.** Схема починає працювати після подання живлення. Алгоритм роботи побудований так, що на першому етапі проходить ініціалізація зовнішньої периферії, а потім – аналіз записаних в EEPROM пам'ять даних. Після конфігурування системи визначається режим її роботи. Для правильної роботи нейронної мережі її потрібно попередньо навчити. Тому при першому включенні мікроконтролер запускає задачу навчання нейронної мережі. Схема починає аналізувати вхідні дані по USART інтерфейсу. Для запису навчальної вибірки розроблено механізм завантаження динамограм або струмограм через послідовний порт комп'ютера (COM PORT) за допомогою MATLAB (рис.4.11).

```

% Очищення буфера
clear;
% завантаження масиву з даними
Sd = load('D:\data_input\dyn312_0-5.DAT');
N_1 = length(Sd(:, 1));
% Відкриття з'єднання
s=serial('COM5');
set(s,'BaudRate', 9600);
set(s,'DataBits', 8);
set(s,'StopBit',1);
set(s,'Parity','none');
set(s,'FlowControl','none');
set(s,'InputBufferSize',2048);
set(s,'ByteOrder','bigEndian');
set(s,'ReadAsyncMode','continuous');
fopen(s);
% Передача даних
for i = 1:1
    fprintf(s, mat2str(Sd(i, 2)));
    pause(1);
end
%Закриття з'єднання
fclose(s);

```

Рис. 4.11. Програмний код передачі масиву через послідовний порт комп'ютера.

За допомогою блоку узгодження інтерфейсів USART–USB під'єднується мікроконтролер до комп'ютера. Після встановлення відповідного програмного забезпечення на комп'ютері можна працювати з віртуальним COM портом. Таке рішення дає можливість передавати інформацію зі швидкістю 9600 бод/с.

Далі опрацьовується вхідний масив і виводиться інформація про успішне завантаження даних, як показано на рис.4.12.



Рис. 4.12. Графічне відображення завантаження масиву з даними.

Після завантаження всієї навчальної вибірки (в даному випадку 72 кбайт = 20 x 60 x 70) продовжує роботу програма для навчання нейронної мережі. Запускається алгоритм навчання і в EEPROM пам'ять записуються значення вагових коефіцієнтів нейронів мережі. Схема переводиться в штатний режим роботи і починає працювати з зовнішніми пристроями (давачами, ПЧ, LCD дисплеєм). Для емуляції давачів використану ту ж програму (рис. 4.12), що і для завантаження навчальної вибірки з трохи зміненим алгоритмом подачі даних.

**4.4.2. Штатний режим роботи (керування швидкістю двигуна).** На наступному етапі роботи алгоритму аналізується завантажений масив і запускається задача формування зображення для подальшого розпізнавання. Згідно розробленого алгоритму зусилля на штоці чи діюче значення струму перераховується у відносні одиниці і складається бінарна матриця.

На рис. 4.13 наведено графічне представлення оцифрованого масиву використовуючи програмну модель в MATLAB та зображення створене мікроконтролером на LCD екрані. Видно, що мікроконтролер добре справляється з перетворення даних і правильно формує вхідне зображення. Результат роботи задачі виводиться на дисплей та подається на вхід нейронної мережі.

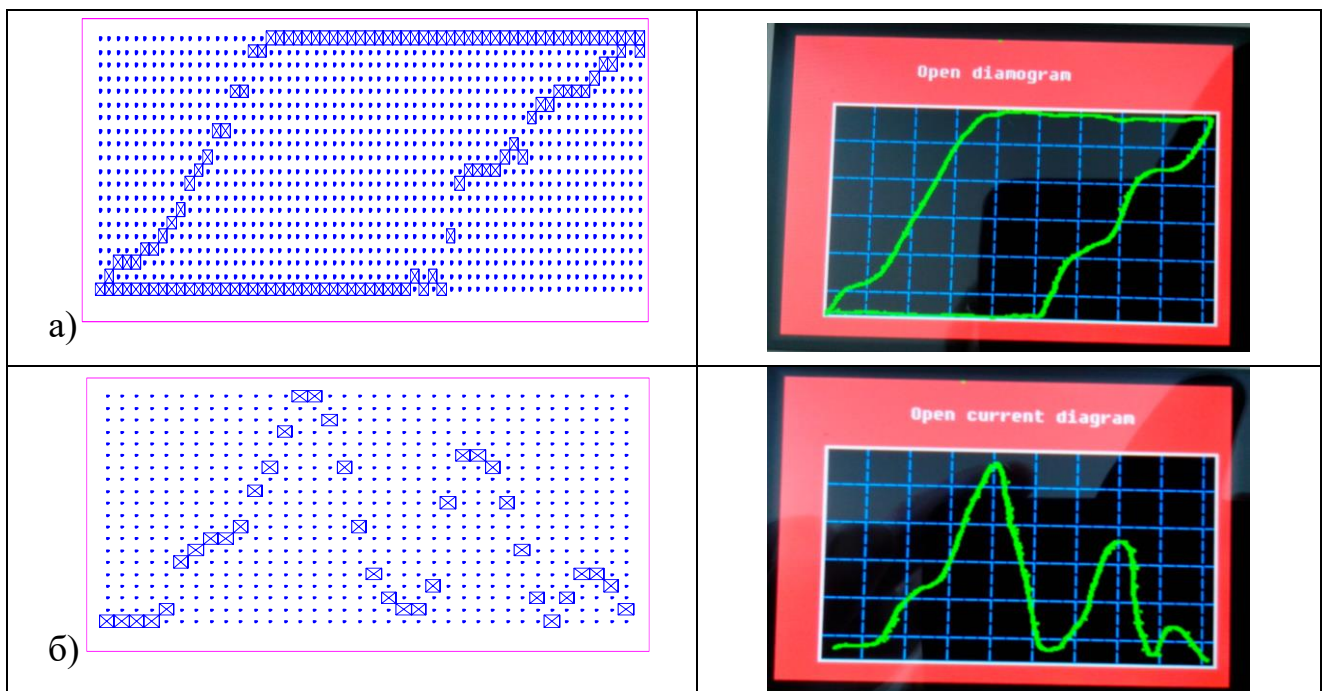


Рис. 4.13. Графічне відображення сформованої бінарної матриці а) динамограми б) струмограми.

Результатом роботи нейронної мережі є правильно розпізнане вхідне зображення та номер класу до якого воно належить.

Далі, аналізується результат і передається керування установкою тому чи іншому блоку (робота з базою даних, аварійний режим роботи, штатний режим з корекцією завдання для частотного перетворювача).

Наведемо деякі результати розпізнавання динамограм:

1. З тестової вибірки через послідовний порт завантажено динамограму з коефіцієнтом заповнення 1 при нормальній роботі верстата-гойдалки. Схема відпрацювала збурення за 284 мс (рис. 4.14).

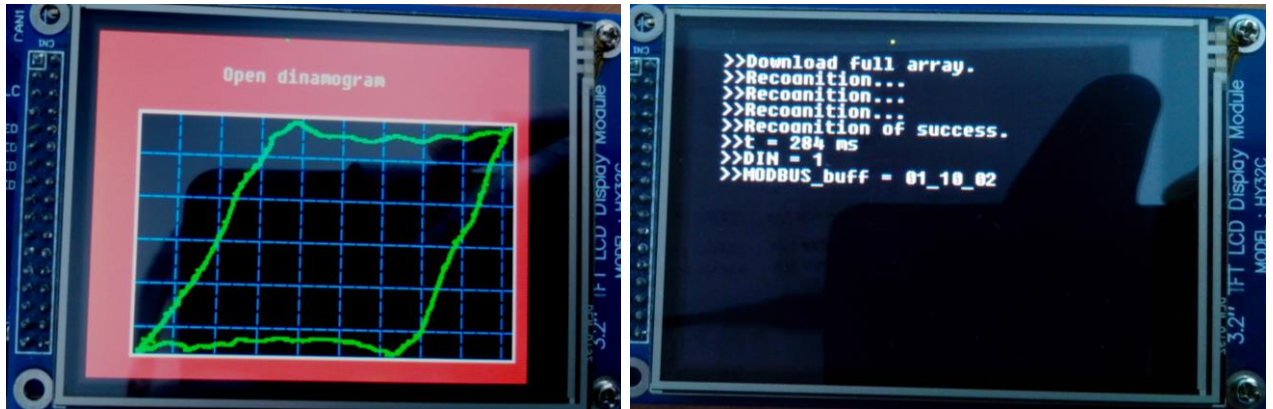


Рис. 4.14. Розпізнавання динамограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3=1$ .

2. Робота схеми при не заповненому циліндрі помпи. На вхід подана динамограма, що знята для коефіцієнта заповнення рівному 0,75. Видно, що час виводу результату збільшився за рахунок ускладнення пошуку в базі даних. Але після завершення схема визначила стан свердловини та сформувала керуючий вплив (рис. 4.15).

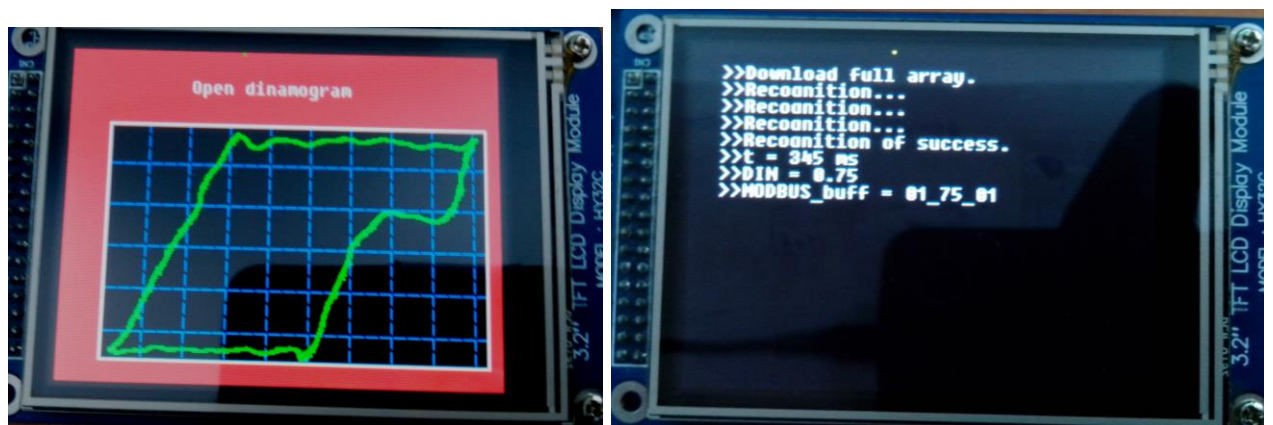


Рис. 4.15. Розпізнавання динамограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3 = 0,75$ .

3. Робота схеми при критичному коефіцієнті заповнення помпи. В цьому випадку схема після розпізнавання згідно з алгоритмом формує керуючий вплив частотному перетворювачу для повної зупинки установки аж до

відновлення свердловини (час простою встановлюється індивідуально для конкретної свердловини оператором) (рис. 4.16).

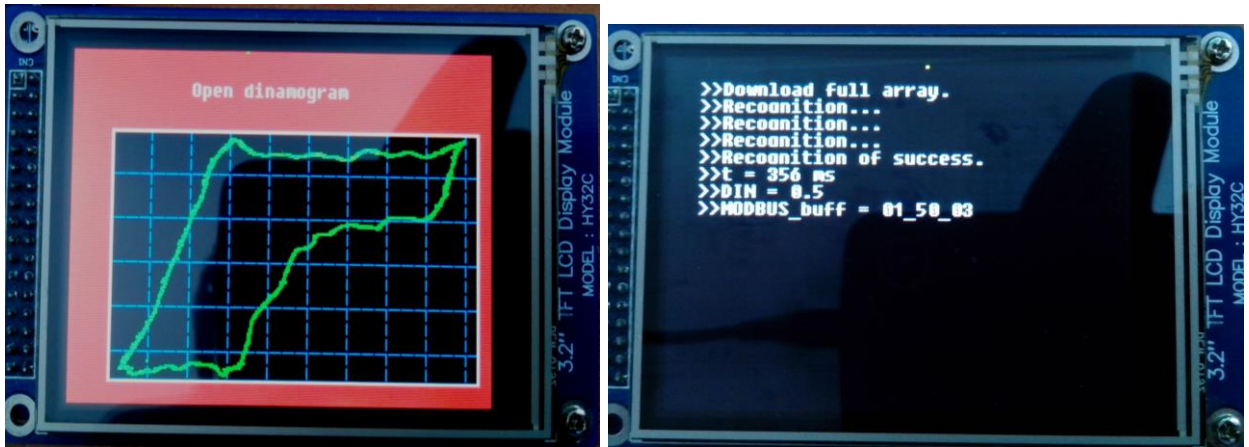


Рис. 4.16. Розпізнавання динамограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3 = 0,5$ .

Аналогічні режими роботи установки розглянуто при розпізнаванні струмограм (рис. 4.17). Для цього зроблена корекція в програмному забезпеченні та перепрограмовано мікроконтролер.

Результати розпізнавання струмограм:

1. Робота схеми в нормальному режимі роботи з коефіцієнтом заповнення 0,95. В такому режимі схема тільки веде базу даних та керує перетворювачем частоти.

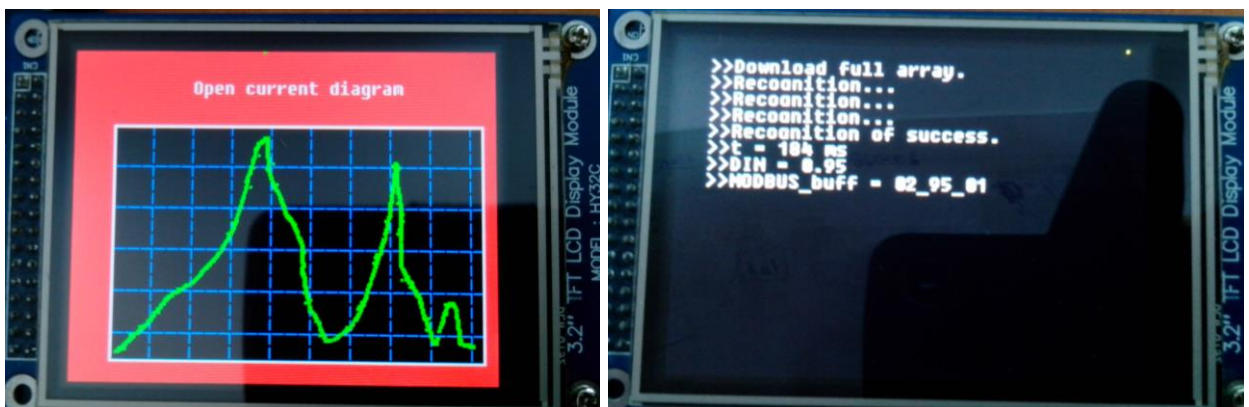


Рис. 4.17. Розпізнавання струмограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3 = 0,95$ .

2. Робота схеми в нормальному режимі роботи з низьким коефіцієнтом заповнення (рис. 4.18). Тут опрацьовуються вхідні дані і формується завдання для перетворювача частоти на зниження швидкості обертання АД.

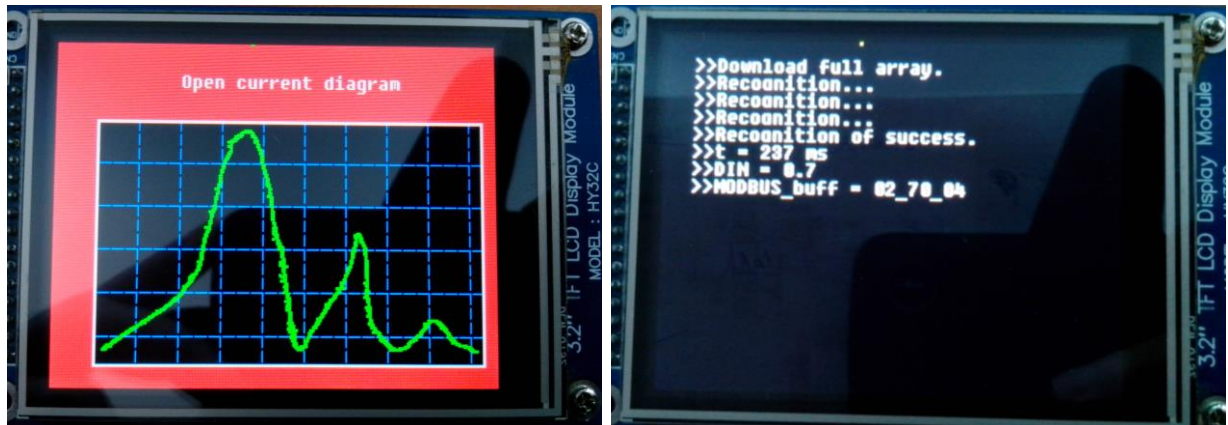


Рис. 4.18. Розпізнавання струмограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3 = 0,7$

3. Робота схеми, де коефіцієнт заповнення знизився до надто низького значення. Результатом роботи установки в такому випадку буде зупинка привідного двигуна та відправлення повідомлення диспетчеру (рис. 4.19).

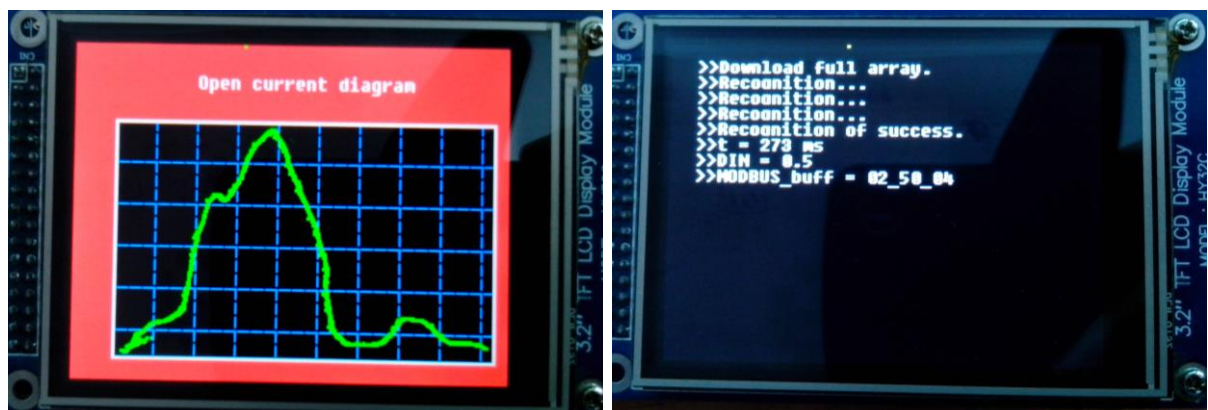
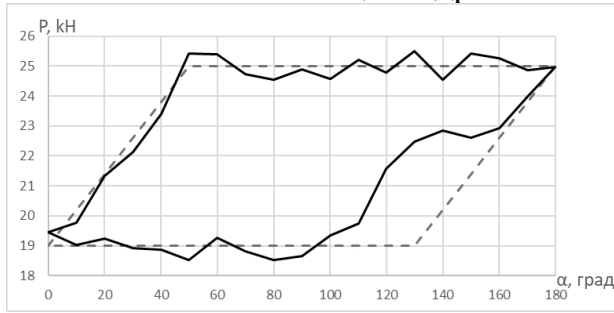


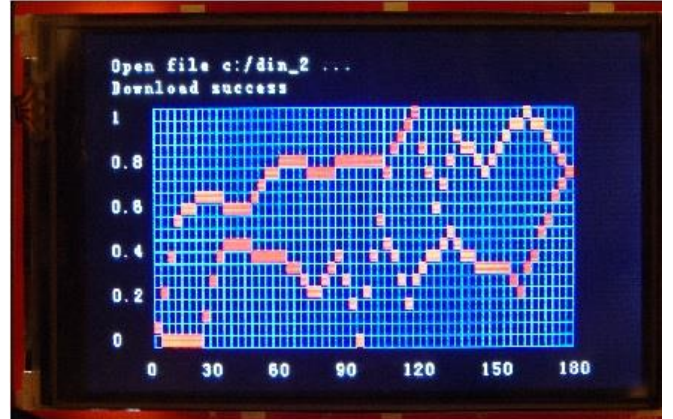
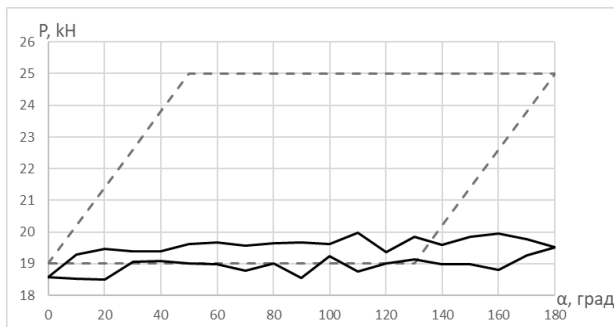
Рис. 4.19. Розпізнавання струмограми з коефіцієнтом заповнення  $k_3 = 0,5$ .

**4.4.3. Аварійні режими роботи.** На рис.4.20 наведено графіки динамограм для типових аварійних режимів та їх оцифровані аналоги.

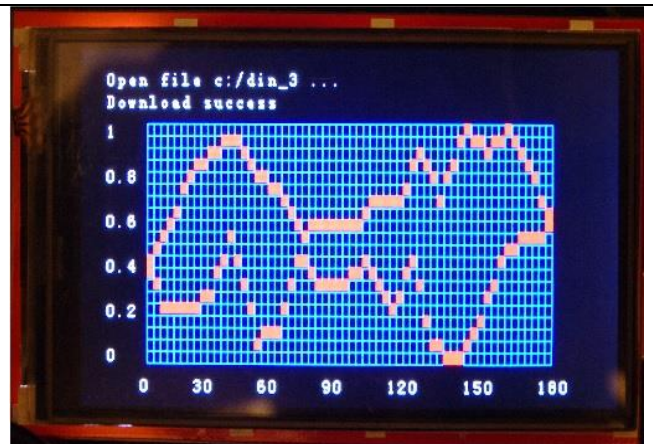
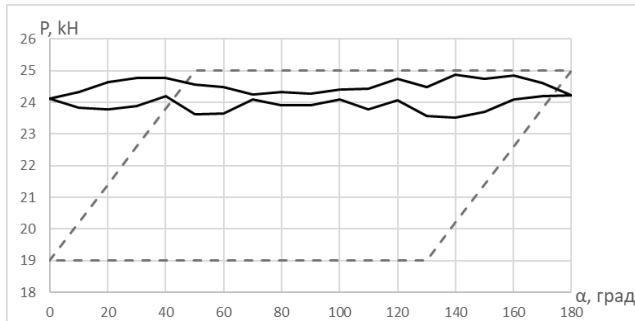
**Вплив газу на роботу помпи, неповне заповнення циліндра**



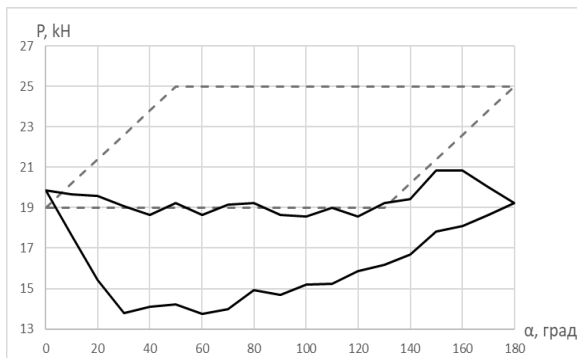
**Несправність нагнітальної частини помпи**



**Несправність приймальної частини помпи**



**Несправність приймальної частини помпи**





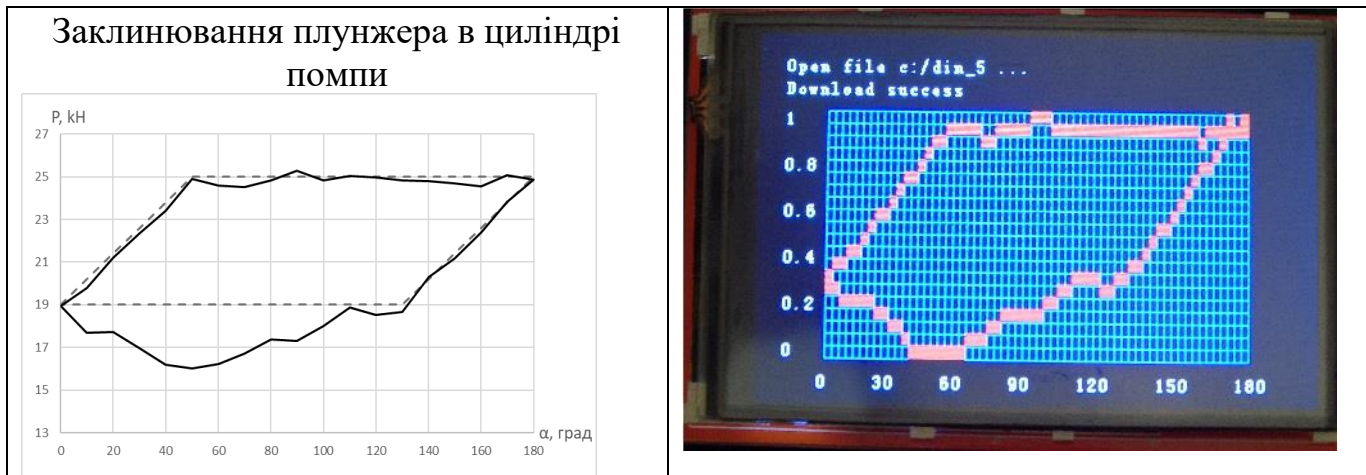
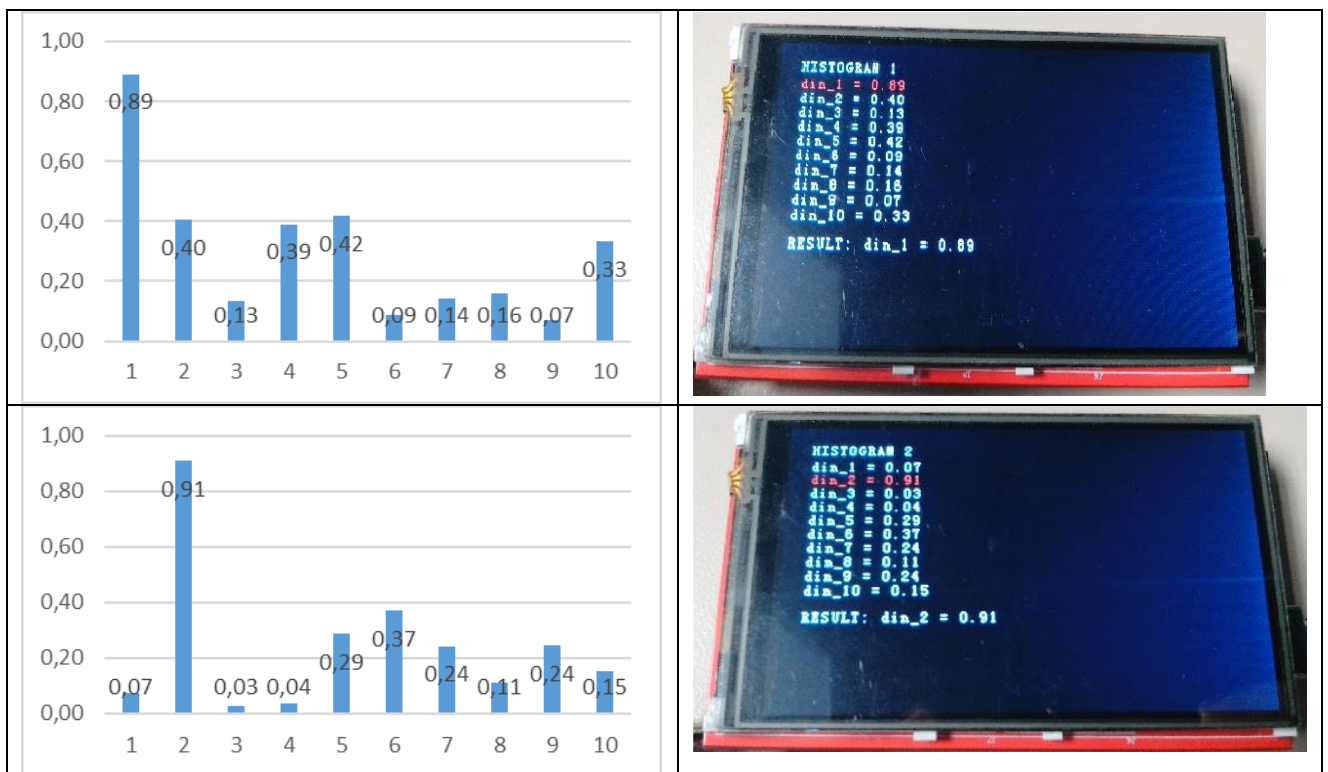


Рис. 4.20. Динамограми при аварійних режимах роботи.

На рис. 4.21 показано результати моделювання в системі MATLAB Simulink, які проводилися в розділі 3 та результат роботи мікроконтролерної системи. Результатом роботи системи є правильно розпізнане вхідне зображення та номер класу до якого воно належить. З наведених результатів видно, що результати є ідентичними.



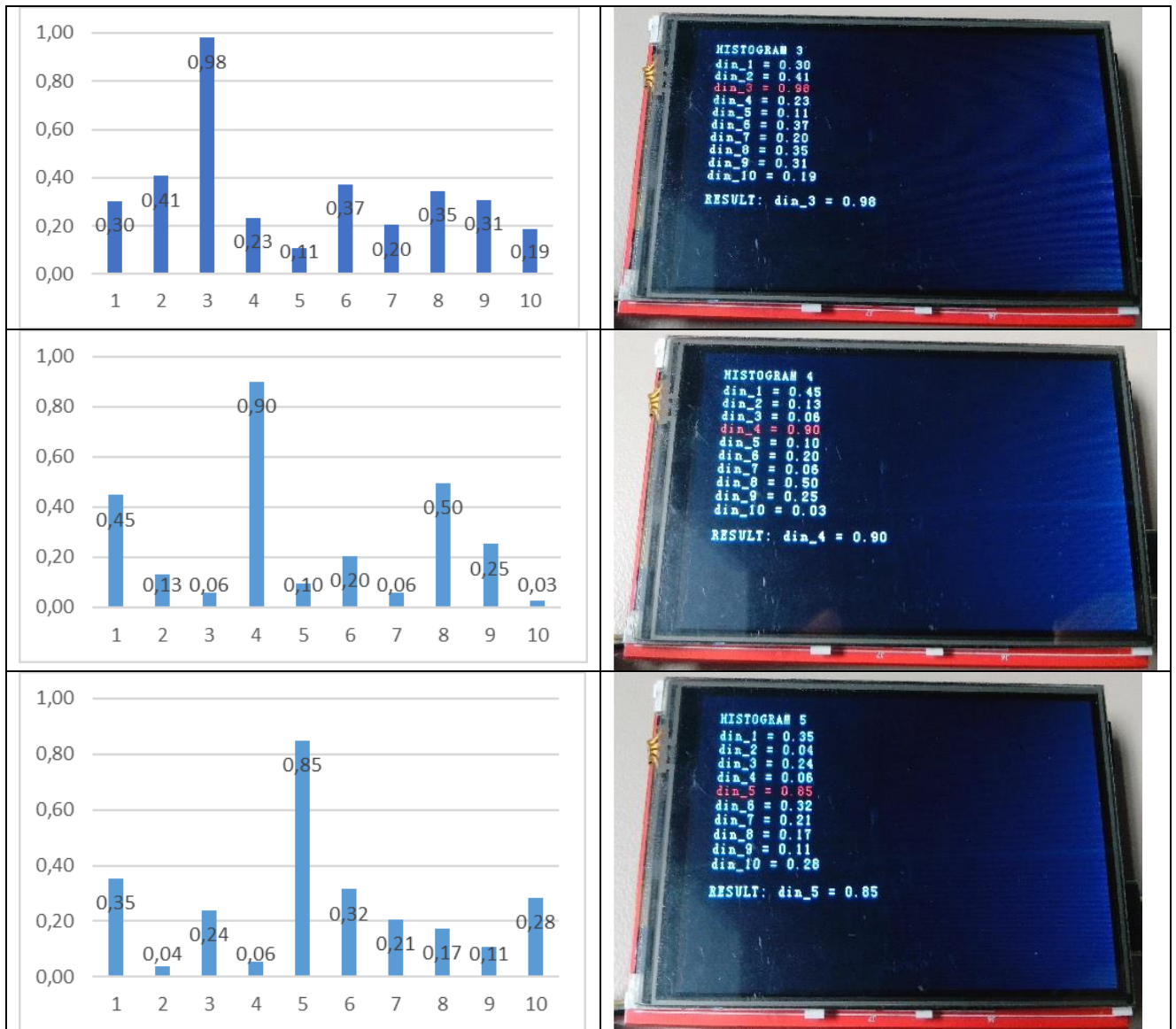


Рис.4.21. Результат розпізнавання динамограм в аварійних режимах роботи.

На основі проведених експериментів встановлено, що схема добре відпрацьовує вхідні дані, як динамограм так і струмограм. Швидкодія мікроконтролера та правильно підібране програмне забезпечення дозволяє одночасно працювати з частотним перетворювачем, групою давачів, базою даних, GSM-модемом, LCD дисплеєм та клавіатурою.

Отриманий результат розпізнавання передається системі керування ШНВУ, яка приймає рішення про поточний стан установки (нормальна робота, аварійний режим роботи, штатний режим з корекцією завдання для частотного перетворювача). Якщо нейронна мережа отримує значно “зашумлений” зразок

або зразок невідомого режиму роботи, то передається керування оператору і оператор може віднести розпізнаний зразок до вже існуючого класу з навчальної вибірки або створити новий клас. Таке рішення дає можливість в процесі роботи схеми з часом підвищити процент правильних розпізнавань зображень.

На рис.4.22 наведено розпізнану струмограму невідомого режиму.

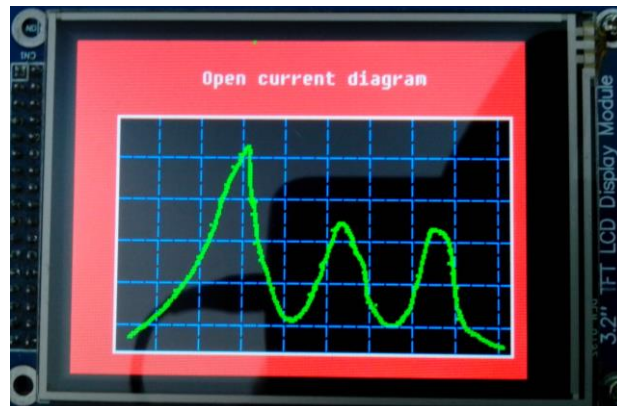


Рис. 4.24. Струмограма невідомого режиму роботи

Оскільки в процесі роботи система має можливість перенавчатися, то вона може адаптуватися для роботи з ШНВУ різних типів з одним апаратним та програмним забезпеченнями

Створений лабораторний стенд системи керування нафтовидобувною установкою може повністю відтворювати режими роботи нафтової свердловини. Крім того, розроблена апаратно-програмна платформа дає змогу в подальшому розвивати і доповнювати алгоритми обробки даних без додаткових апаратних засобів.

Програмна реалізація розроблених алгоритмів та комп'ютерне симулювання показали високу ефективність й перспективність їх застосування до розв'язання широкого кола інженерних задач аналізу роботи нафтовидобувних установок.

## Висновки

1. Розроблені математичні моделі і алгоритми дали змогу створити лабораторний стенд для дослідження режимів роботи нафтовидобувної установки. Елементна база розробленого стенду складається з високоефективного мікропроцесорного обладнання. Велика кількість апаратних інтерфейсів дає можливість підвищити швидкодію програми в реальному часі, що є важливим для керування нафтовими свердловинами.

2. Вибраний мікроконтролер має велику кількість пам'яті, що дає можливість використовувати для керування операційну систему реального часу. Швидкодія мікроконтролера та правильно підібране програмне забезпечення дає змогу одночасно працювати з частотним перетворювачем, групою давачів, базою даних, GSM-модемом, LCD дисплеєм та клавіатурою.

3. Випробування на тестовому стенді показали, що схема здатна відпрацьовувати різні режими роботи ШНВУ, в тому числі і аварійні. Оскільки алгоритм обробки даних універсальний, то система однаково добре обробляє вхідні дані, як динамограми так і струмограми.

4. Результати експериментів, які проводилися на лабораторному стенді збігаються з тими, які отримані під час комп'ютерного моделювання. Створена система має можливість перенавчатися, а тому може адаптуватися для роботи з ШНВУ різних типів з одним і тим самим апаратним та програмним забезпеченням.

5. Програмна реалізація розроблених алгоритмів та комп'ютерне симулювання показали високу ефективність й перспективність їх застосування до розв'язання широкого кола інженерних задач аналізу

Викладені в розділі матеріали опубліковані в роботах [79, 85].

## ВИСНОВКИ

Дисертаційна робота спрямована на вирішення актуальної проблеми нафтовидобування – вдосконалення існуючих і розроблення нових ефективних методів ідентифікації технологічного стану нафтовидобувного обладнання та синтез на їх основі системи комп'ютерної діагностики та автоматичного керування електроприводом ШНВУ малодебітної свердловини.

1. В технічній літературі описана значна кількість методів і засобів діагностики стану обладнання ШНВУ з метою встановлення раціонального режиму експлуатації малодебітних свердловин, однак в Україні майже відсутні автоматизовані системи керування роботою ШНВУ провідних світових виробників. Натомість використовуються переносні діагностичні комплекси, які не можуть забезпечити автоматичне керування установками в реальному часі. Підвищення ефективності та надійності систем керування роботою ШНВУ малодебітних свердловин потребує нових теоретичних і практичних рішень, придатних для реалізації в інтелектуальних системах.

2. Одним з основних завдань під час синтезу автоматизованої системи керування ШНВУ є вибір способу обробки вхідної інформації, якою в основному є динамограми або ватметрограми, та створення алгоритму ідентифікації стану обладнання свердловини. Більшість існуючих методів розпізнавання динамограм мають низку недоліків, які суттєво обмежують їх застосування. Найбільш придатними є методи ідентифікації, які базуються на теорії штучних нейронних мереж. Їх використання дає змогу ефективно вирішувати задачі автоматизації процесу розпізнавання і адаптивного керування роботою ШНВУ, тому актуальною задачею є створення на базі сучасної мікропроцесорної техніки системи керування, яка забезпечує раціональний режим роботи нафтової свердловини в режимі реального часу.

3. Результати застосування штучних нейронних мереж в системах автоматизації процесів нафтовидобутку в значній мірі залежать від структури нейромережі. Аналіз відомих їх типів показав, що для створення

інтелектуальних систем керування роботою ШНВУ найбільш придатними є рекурентні нейронні мережі, оскільки вони краще адаптуються до зміни характеристик свердловини та її обладнання. Проведені дослідження показали, що ці мережі, зокрема мережа Хемінга, дає можливість при невеликих апаратних ресурсах ефективно розпізнавати необхідну кількість зображень з достатньою точністю. В роботі запропонована модифікація мережі та розроблений алгоритм, який суттєво збільшує швидкодію розпізнавання.

4. Запропонована система керування роботою ШГВУ розроблена за класичним підходом до систем автоматизації промислових установок із зворотним зв'язком за коефіцієнтом заповнення помпи. Унікальністю системи є використання нейронної мережі. Ефективність роботи такої системи залежить від значної кількості факторів. Перш за все – це структурний і параметричний синтез нейронної мережі, формування вхідних даних для навчання мережі та її роботи, адекватність математичної моделі установки та ін.

5. В роботі на основі нелінійних математичних моделей верстата-гойдалки і АД високої адекватності та модифікованої штучної нейронної мережі Хемінга розроблено динамічну модель електроприводу ШНВУ. Створена модель, є основою для створення на сучасній математичній основі "інтелектуальної" системи керування свердловиною, оскільки дає змогу отримувати достовірну інформацію про поведінку всієї електромеханічної системи нафтовидобувної установки в різних умовах роботи.

6. Розроблена математична модель дає змогу аналізувати процеси в асинхронному електроприводі ШНВУ в реальному часі і розраховувати необхідну для збалансованого щодо дебіту свердловини швидкість обертання ротора АД з метою регулювання частоти напруги живлення, яка в умовах малого дебіту пласта забезпечує неперервну роботу установки з високим коефіцієнтом наповнення помпи і коефіцієнтом потужності. Програма, яка реалізує розроблений алгоритм, має високу швидкодію, що дає змогу оперативно формувати керуючі впливи відповідно до умов роботи установки, з

урахуванням обмежень по нагріванню АД. моменту навантаження, струму чи потужності.

7. Розроблений в роботі метод розрахунку механічних характеристик АД дає змогу здійснювати їх аналіз при різних законах регулювання напруги та частоти з метою забезпечення необхідного закону зміни електромагнітного моменту АД. Як показали розрахунки, вигляд механічних характеристик при різних частотах залежить не тільки від закону регулювання, але й від форми пазів ротора, тому класичні заступні схеми не забезпечують необхідної точності результатів визначення електромагнітного моменту.

8. Важливим під час синтезу автоматизованої системи керування ШНВУ є вибір програмно-апаратної бази. В процесі вибору слід враховувати такі фактори, як швидкість оброблення великої кількості даних, можливість обміну інформацією з базою даних на зовнішніх носіях, підтримка сучасних файлових систем (fat32, NTFS), наявність інтерфейсів для зв'язку з зовнішньою периферією (USART, SPI, USB, ETHERNET), обсяг енергоспоживання, зручність в налагодженні та експлуатації.

9. Випробування на тестовому стенді показали, що схема здатна відпрацьовувати різні режими роботи ШГВУ, в тому числі і аварійні. Вона однаково добре обробляє вхідні дані, як динамограми так і струмограми. Результати експериментів, які проводилися на лабораторному стенді збігаються з отриманими під час комп'ютерного моделювання. Створена система керування має можливість перенавчатися, а тому може адаптуватися для роботи з ШГВУ різних типів з одним і тим самим апаратним та програмним забезпеченням.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Акульшин О. І., Бойко В. С., Дорошенко В. М. Технологія видобування, зберігання і транспортування нафти і газу: навч. посіб. Івано-Франківськ: Факел, 2003. 434 с.
2. Акульшин О.О. Про встановлення режимів експлуатації свердловин установками штангових глибинних насосів за умови  $R_{виб} < R_{нас}$ . Нафтова і газова промисловість. 2004. № 5. С. 20-31.
3. Алехин С.А., Кипнис С.Г., Оруджев В.Л., Островская А.К. Автоматизация периодически работающих скважин. М.: Недра, 1970. 112 с.
4. Алиев Т. А., Нусратов О. К. Методы и средства диагностики глубиннонасосного оборудования нефтяных скважин. Нефтяное хозяйство. 1998. № 9. С. 78–80.
5. Алиев Т.М., Тер-Хачатуров А.А. Автоматический контроль и диагностика скважинных штанговых насосных установок. М: Недра, 1988. 231с.
6. Альтшулер М.И. Работы ОАО “ВНИИР” в области электроприводов для нефтедобычи. Труды АЭН Чуваш. респ. 2000. № 2. С.25–27.
7. Андреев В.В., Уразаков К.Р., Далимов В.У. Справочник по добыче нефти: под ред. К.Р.Уразакова. М.: ООО "Недра–Бизнесцентр". 2000. 374 с.
8. Андрейшин А.С., Маляр А.В., Калужний Б.С., Лещук С.М. Вибір нейронної мережі для розпізнавання стану нафтової свердловини. Вісник НТУ ХПІ “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. 2013. № 36. С.495–496.
9. Андрейшин А.С. Розпізнавання стану свердловини та нафтовидобувного обладнання на основі нейронної мережі. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. 2013. Вип. 2/2013(22). Ч.2. С.184–188.
10. Андрейшин А.С. Система розпізнавання динамограм нафтової установки на нейронній мережі: XII Міжнародна науково-технічна конференція “Проблеми сучасної електротехніки”, м. Вінниця, 4–8 червня, 2012. 1 електрон. опт. диск (CD-R).



11. Архипов К.И., Попов И.В., Попов В.И. Справочник по станкам-качалкам. Альметьевск: НИИ. 2000. 146 с.

12. Астанин В.О., Усачев А.П., Хомяков В.В. Мехатронный привод штангового насоса для автоматизированной добычи нефти. Нефтяное хозяйство. 2004. № 4. С. 90–91

13. Барский В.А., Курдюмов Д.С. Использование автоматизированного регулируемого электропривода в составе станции управления штанговой глубинно-насосной установки. Вестник НТУ ХПИ “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. 2003. Вып. 10, т.1. С. 284.

14. Барский В.А., Курдюмов Д.С., Колесник А.А. Опыт применения автоматизированного регулируемого электропривода штанговой глубинно-насосной установки РЭН2Н в полевых условиях. Вестник НТУ ХПИ “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. 2002. Вып 12, т.1. С. 206–209.

15. Барский В.А., Курдюмов Д.С. Станция управления штанговой глубинно-насосной установкой с частотно-регулируемым электроприводом. Міжвід. наук.-техн. зб. “Електромашинобудування та електрообладнання”: “Проблеми автоматизованого електропривода. Теорія і практика”. 2006. Темат. вип. С 170–172.

16. Барский В.А. Проблемы построения системы управления параметрами станков-качалок с регулируемым приводом. Вестник НТУ ХПИ “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. 2001. Вып. 9. С. 470–471.

17. Бахтизин Р.Н., Уразаков К.Р., Тимашев Э.О., Белов А.Е. Новый метод количественной диагностики технического состояния установок скважинных штанговых насосов решением обратных задач методами многомерной оптимизации. Нефтяное хозяйство. 2019. № 7. С. 118–122.

18. Белоусенко И.В., Шварц Г.Р., Великий С.Н., Ершов М.С., Яризов А.Д. Новые технологии и современное оборудование в электроэнергетике нефтегазовой промышленности. М.: ООО “Недра-Бизнесцентр”, 2007. 478 с.

19. Беляев Е.Ф., Ташкинов А.А., Цылев П.И. Совершенствование электропривода станков-качалок нефтяных скважин с малым дебитом. Вестник ПНИПУ “Нефтегазовое и горное дело”. 2016. № 4. С. 91–102.

20. Білик П.Д., Чумак В.В. Узагальнена багатозарова математична модель асинхронного тягового двигуна для аналізу перехідних процесів в електроприводах рухомого складу. Праці ІЕД НАНУ. 2002. № 3. С. 93–103.

21. Біляковський І.Є. Математичне моделювання електромагнітних процесів асинхронних машин з урахуванням насичення й витіснення струму при живленні несиметричними полігармонічними напругами: Автореф. дис. канд. техн наук: 05.09.01/Держ. ун-т “Львівська політехніка”. Львів, 1996. 18 с.

22. Бобылев О.А. Диагностика периодически работающих установок скважинных штанговых насосов. Нефтяное хозяйство. 2002. № 2. С. 82–83.

23. Бойко В.С., Кіндрат Р.М., Яремійчук Р.С. Довідник з нафтогазової справи. Львів: ІФДТУНГ, 1996. 620 с.

24. Бойко В.С., Поліщук С.П., Піта А.І., Орлів В.С. Оптимізація тривалості часу роботи нафтових свердловин між повторними тепловими обробленнями. Розробка та експлуатація нафтових і газових родовищ. 2005. № 3(12). С. 67–71.

25. Бойко В.С. Розробка та експлуатація нафтових родовищ. К.: Реал Прінт. 2004. 695 с.

26. Бояркин М.А., Шапцев В.А. Исследование деятельности оператора-технолога нефтегазопромысла по данным архива SCADA-системы. Нефть и газ. 2007. № 3. С. 96–102.

27. Васильев А. Е. Микроконтроллеры: разработка встраиваемых приложений: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. 210 с

28. Васків О.В., Заміховський Л.М., Ровінський В.А., Шумада В.М. Локальна система діагностування штангових глибинно–насосних установок.

Розвідка і розробка нафтових і газових родовищ. Вип. 37 (Т.8). Ів.-Франківськ, 2000. С. 166–173.

29. Велиев Ф.Г., Абдинов В.Ю., Манюхин Н.М. Устройство для плавного изменения производительности глубиннонасосной установки. Нефтяное хозяйство. 1993. № 3. С. 59–60.

30. Габдрахманов Н.Х. Научные основы и технологии насосной эксплуатации малодебитных скважин в поздние периоды разработки нефтяных месторождений: автореф. дис. докт. техн. наук: 25.00.17. Уфа, 2005. 35 с.

31. Галеев А.С., Арсланов Р.И., Ермилов П.П., Кузьмин И.А. Контроль технического состояния ШСНУ в процессе периодической эксплуатации. Электронный журнал “Нефтегазовое дело”, 2012. № 1. С. 24–30.

32. Генин В.С. Методы и технические средства управления, контроля и испытаний электротехнического и технического оборудования нефтегазодобывающих предприятий. автореф. дис. докт. техн. наук: 05.09.03. Москва, 2008. 35 с.

33. Гизатулин Ф. А., Хакимьянов М. И. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок. Электротехнические и информационные комплексы и системы. № 1, т. 13. 2017. С. 11–20,

34. Головкин В.А. Нейронные сети. Обучение, организация и применение. Книга 4. М.: ИПРЖР, 2001. 256 с.

35. Горбань А.М., Дунин-Барковский В.Л., Кидрин А.Н. Нейроинформатика. М.: ИНТУИТ, 2016. 330 с.

36. Горбійчук М. І. Моделювання об'єктів і систем керування у нафтовій та газовій промисловості: навч. посібник. Івано-Франківськ: Факел, 1999. 603 с.

37. Горшков Р.Г., Кротков Е.А., Сигова О.Б. Аппроксимация тока нагрузки электропривода установки штангового скважинного насоса. Вестник Самарского госуд. технич. ун-та. 2010. № 4 (27).

38. Грей Форест. Добыча нефти: пер. с англ. М: ЗАО “Олимп-Бизнес”, 2003. 416 с.

39. Гусаров А.А. Повышение быстродействия диагностирования автоматизированных штанговых нефтяных установок: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.13.06: Оренбург. 2006. 20 с.

40. Дорошенко В.М., Зарубін Ю.О., Гришаненко В.П., Прокопів В.Й., Швидкий О.А. Основні напрями вдосконалення систем розробки родовищ та потенціал нарощування видобутку нафти в Україні. Нафтова галузь України. 2013. № 2. С. 27–30.

41. Дунаев И.В. Диагностика и контроль скважинной насосной установки на основе динамометрирования и нейросетевых технологий: Автореф. дис... канд техн. наук: Уфа, 2007. 16 с. /Уфим. гос. авиац. техн. ун-т. 05.13.06. 16 с.

42. Дьяконов В.П., Круглов В.В. MATLAB 6.5 SP1/7/7 SP1/7 SP2 Simulink 5/6. Инструменты искусственного интеллекта и биоинформатики. М.: СОЛОН-ПРЕСС, 2006. 456 с.

43. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. [Електронний ресурс]. –2013. Режим доступу: <http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/n0002120-13>.

44. Жук Е., Шимчак П. Система Lufkin Automation контролирует работу скважин в Беларуси. Нефть и газ. Евразия. 2006. № 8. С.16–27.

45. Жулин С.С. Метод продолжения по параметру и его приложения к задачам оптимального управления. Вычислительные методы и программирование. 2007. Т.8. С.205 – 217.

46. Зайцевский И.В., Свиридов А.П., Слесарев Д.А. Нейронные сети и их приложения. М: МЭИ. 2002. 95с.

47. Зарубин Ю.А., Бойко В.С., Гришаненко В.П., Швидкий О.А. Научные основы совершенствования систем разработки месторождений нефти и газа. Prace Instytutu Nafty I Gazu. Krakow. 2012. № 182. С. 33–37.

48. Зюзев А.М., Метельков В.П. Оценка теплового ресурса электродвигателя штанговой глубинной насосной установки. Научные труды SWorld. 2012. Т.5. №2. С. 59–62.

49. Ивановский В.Н., Садчиков Н.В., Улюмджиев А.С. К вопросу оптимизации закона движения выходного звена привода штанговой насосной установки. Территория “НЕФТЕГАЗ”. 2012. № 5. С. 86–90.

50. Исаченко И.Н. Алгоритмическое и программно-техническое обеспечение контроля состояния штанговых и электроцентробежных насосных установок по электрическим параметрам их на входе: Автореф. дис... канд техн. наук: 05.11.13. Томск, 2004. 18 с.

51. Исупов В.В., Софонов С.А. Контролер скважины, оснащенной ШГН (КШГН). Нефтяное хозяйство. 1998. № 5. С. 64–65.

52. Калацкая Л. В., Новиков В. А., Садов В. С. Организация и обучение искусственных нейронных сетей. Экспериментальное учеб. пособие. – Минск: Изд-во БГУ. 2003. 72 с.

53. Каллан Р. Основные концепции нейронных сетей. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2001. 287 с.

54. Каплан Л.С. Современные технологии и техника эксплуатации скважин штанговыми насосами: учебное пособие. Уфа: УГНТУ, 2005. 334с.

55. Карп І.М., Єгер Д.О, Зарубін Ю.О., Гунда М.В. [та ін.]: Стан і перспективи розвитку нафтогазового комплексу України: монографія. К.: Наукова думка, 2006. 310 с

56. Ключев В.И. Теория электропривода: учебник для вузов. М.: Энергоатомиздат, 2001. 704 с.

57. Ковшов В.Д., Емец С.В., Хакимьянов М.И., Светлакова С.В. Датчики усилия для систем динамометрирования штанговых глубинных насосов добычи нефти. Электронный журнал “Нефтегазовое дело”. Уфа, 2007.

58. Ковшов В.Д., Сидоров М.Е., Светлакова С.В. Моделирование динамограммы станка-качалки. Нефтяное хозяйство. 2005. № 11. С. 23–25.

59. Ковшов В.Д., Сидоров М.Е., Светлакова С.В. Динамометрирование, моделирование и диагностирование состояния глубинной штанговой насосной установки. Известия вузов. Нефть и газ. 2011. № 3 . С. 25–29.

60. Копадзе С.А., Цвик Б.М., Бабій Н.В., Росткович О.Б. Спосіб розрахунку оптимізації роботи штангових глибинних насосів. Нафтова і газова промисловість. 2006. №2 С. 25–27.

61. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высшая школа, 2001. 327 с.

62. Костянян В.Р., Тер-Хачатуров А.А. Автоматическая обработка динамограмм в диалоговой системе контроля глубинных насосов. Известия вузов. Нефть и газ. 1986. № 2. С. 70–75.

63. Коршак А.А., Шаммазов А.М. Основы нефтегазового дела: учебник для вузов. Уфа: ООО “Дизайн Полиграф Сервис”. 2005. 528 с.

64. Кравчик А.Э, Логинов С.Е., Сальнов А.С., Тубис Я.Б. Асинхронные двигатели с повышенным пусковым моментом для привода станков-качалок. Нефтяное хозяйство. 2002. № 2. С. 80–81.

65. Кравчик, М.М. Шлаф, В.И. Афонин, Е.А. Соболенская А.Э. Асинхронные двигатели серии 4А: Справочник. М.: Энергоиздат. 1982. 504с.

66. Круглов В.В., Борисов В.В. Искусственные нейронные сети. М.: Горячая линия–Телеком, 2002. Теория и практика. 382 с.

67. Куцик А.С., Місюренко А.С. Автоматизовані системи керування на програмованих логічних контролерах: навч. посібник. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2011. 200 с.

68. Ли Дж. Ф., Геральд У.У., Снайдер Р.Э. Инновационные разработки в механизированной добыче нефти, ч.1: Перевод с англ. Нефтегазовые технологии. 2003. № 5. С. 20–26.

69. Ли Дж. Ф., Амосо Т. Новое в механизированной добыче нефти: перевод с англ. Нефть, газ и нефтехимия за рубежом. 1992. № 9. С. 10–16.

70. Ли Дж. Ф., Винклер Х., Снайдер Р. Что нового в механизированной добыче нефти: перевод с англ. Нефтегазовые технологии. Ч.1: 2005. № 8. С. 16–24.

71. Логинов С.Е., Сальнов А.С., Тубис Я.Б. Асинхронные электродвигатели для привода станков-качалок: перевод с англ. Нефтяное хозяйство. 2000. № 12. С. 87–90.

72. Лозинський А.О. Електромеханічні системи автоматизації технологічних об'єктів з інтелектуальним керуванням: автореф. дис. д-ра техн. наук: 05.09.03 – електротехнічні комплекси та системи. Львів: Нац. ун-т “Львівська політехніка”. 2004. 41 с.

73. Лозинський А.О., Карплюк Л.Ф., Карплюк Б.Л. Частотно-керований електропривод зі змінним моментом інерції та навантаження. Електромашинобудування та електрообладнання. Темат. вип. “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. 2006. № 66. С.46–47.

74. Лозинський О.Ю., Маляр А.В., Місюренко В.О., Молнар В.В. Система керування електроприводом штангової глибинонасосної установки на базі ПЛК MICRO TSX. Вестник НТУ ХПИ “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика”. 2008. № 30. С.277–279.

75. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Вибір нейронної мережі для визначення коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Тематичний випуск “Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія й практика”. Кременчук: КрНУ. 2012. Вип. 3/2012 (19). С. 543–545.

76. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Розроблення математичної моделі задля розрахунку допустимих параметрів робочих режимів частотно-керованого електроприводу штангової нафтовидобувної установки. Технічна електродинаміка. 2020. №2. С. 43-49.

77. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Використання нейромережі для побудови системи керування електроприводом верстата-гойдалки. Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка” “Електроенергетичні та електромеханічні системи”. 2011. № 707. С 72–82.

78. Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Динамічні та статичні режими роботи електроприводів штангових нафтовидобувних установок. Вісник НУ “Львівська

політехніка” "Електроенергетичні та електромеханічні системи". 2013. № 763. С.54–59.

79. Маляр А.В., Андрейшин А.С. Дослідження аварійних режимів штангової глибинопомпової установки. "Електромеханічні і енергозберігаючі системи", 2014. Вип. 4/2014(28). С.40–47.

80. Маляр А.В., Андрейшин А.С., Місюренко В.О. Застосування фазі-регулятора в системі керування електроприводом штангової нафтовидобувної установки. Вісник НТУ ХПІ "Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика". 2010. С. 569–570.

81. Маляр А.В., Андрейшин А.С., Розпізнавання стану свердловини та нафтовидобувного обладнання на основі нейронної мережі. "Електромеханічні і енергозберігаючі системи". Кременчуцький національний ун-т. 2013. Вип. 2/2013 (22). С. 87–89.

82. Маляр А.В., Андрейшин А.С. Розрахунок збалансованого режиму роботи електроприводу штангової нафтовидобувної установки малодебітної свердловини. Науковий вісник Нац. гірничого ун-ту "Електротехнічні комплекси та системи". Вип. № 4. 2014. С. 39–44.

83. Маляр А.В., Андрейшин А.С., Розрахунок параметрів функціонування штангової нафтовидобувної глибиннопомпової установки. Міжвід. збірник наук. праць "Відбір і обробка інформації". 2013. Випуск 38 (114). С. 75–81.

84. Маляр А.В., Андрейшин А.С., Тацій А.Р. Розпізнавання динамограми верстата-гойдалки за допомогою нейронної мережі. Матеріали XVIII міжнародної конференції з автоматичного управління "Автоматика-2011". м. Львів, 28–30 вересня, 2011. С. 156–157.

85. Маляр А.В., Андрейшин А.С. Калужний Б.С., Головач І.Р. Апаратно-програмна реалізація системи керування штанговою глибинно-помповою установкою. "Електротехнічні та комп'ютерні системи". 2014. Вип. № 15 (91). С. 165–168.



86. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєйшин А.С. Визначення навантажень двигунів штангових глибиннопомпових нафтовидобувних установок. Електротехнічні та комп'ютерні системи., 2011. Випуск 03(79). С 200–201.

87. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєйшин А.С. Використання нейромережі для визначення коефіцієнта заповнення глибинної помпи. Вісник НУ "Львівська політехніка". "Електроенергетичні та електромеханічні системи". 2012. № 736. С. 94–99.

88. Маляр А.В., Калужний Б.С., Андрєйшин А.С. Система автоматичного керування роботою штангової глибиннопомпової установки з врахуванням дебіту пласта. Наукові праці ДонНТУ. Серія Електротехніка і енергетика. 2011. Вип. 11(186). С. 267–270.

89. Маляр А.В., Калужний Б.С. Системи автоматизованого керування і моніторингу процесом видобування нафти: Монографія. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2012. 272 с.

90. Маляр А.В. Математичне моделювання роботи верстата-гойдалки штангової нафтовидобувної установки. Нафтова і газова промисловість. 2008. №3. С. 34–35.

91. Маляр В.С., Маляр А.В., Андрєйшин А.С. Метод розрахунку механічних характеристик асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором. Електротехніка і електромеханіка. 2019. № 2. С. 9–13.

92. Маляр В.С., Маляр А.В. Математическое моделирование периодических режимов работы электротехнических устройств. Электронное моделирование. 2005, т.27. №3. С. 39–53.

93. Малько Б.Д., Попович В.Я., Харун В.Н., Кварцяний В.О. Аналіз ефективності використання потужності електродвигунів верстатів-гойдалок Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2007. № 1. С. 49–52.

94. Малько Б.Д., Харун В.Н., Попович В.Я. Вплив характеристик наземного та глибинного обладнання на режим роботи верстата-гойдалки. Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2006. № 1(13). С. 65–69.

95. Медведев В. С., Потемкин В. Г. Нейронные сети. MATLAB 6 / Под общ. ред. В.Г. Потемкина. М.: ДИАЛОГ–МИФИ. 2002. 496 с.
96. Мезенцев Е.Ф., Тагирова К.Ф. Оптимизация режимов работы группы скважин на основе модели взаимовлияния скважин. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2010, №10. С.22–26.
97. Меньшов Б.Г., Ершов М.С., Яризов А.Д. Электротехнические установки и комплексы в нефтегазовой промышленности: учебник для вузов. М.: ОАО “Недра”, 2000. 487с.
98. Миловзоров Г.В., Хакимьянов М.И., Редькина Т.А., Миловзоров А.Г. Системы управления для интеллектуальных скважин, эксплуатируемых глубинно-насосным способом. Интеллектуальные системы в производстве, 20015. №1(25). С. 55–58.
99. Миркес. Е.М. Нейроинформатика. Красноярск: ИПЦ КГТУ. 2003. 347с.
100. Мокін Б.І. Оптимізація електроприводів. Вінниця: Універсум-Вінниця, 2004. 250 с.
101. Оганезов А.Л. Применение нейронных сетей в задачах распознавания образов: автореф. дис. ... канд. физ-мат. наук : 05.13.11. М. 2010. 20 с.
102. Ортега Дж., Пул У. Введение в численные методы решения дифференциальных уравнений: перевод с англ. / под ред. А.А. Абрамова. М.: Наука, 1986. 288 с.
103. Ортега Дж., Рейнболдт В. Итерационные методы решения нелинейных систем уравнений со многими неизвестными: пер. с англ. М.: Мир, 1975. 558 с.
104. Осовский С. Нейронные сети для обработки информации: пер. с польск. И. Д. Рудинского. М.: Финансы и статистика, 2004. 343 с.
105. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття / За ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка. К.: Укр. енциклопедичні знання, 2001. 398 с.
106. Персиянцев М.Н. Добыча нефти в осложненных условиях. М.: ООО Недр–Бизнсцентр, 2000. 653 с.

107. Петрушин В.С. Асинхронные двигатели в регулируемом электроприводе: учеб. пособие. Одесса: Наука и техника, 2006. 320 с.
108. Пивняк Г.Г., Волков А.В. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией: Монография. Днепропетровск: Нац. горный ун-т, 2006. 470 с.
109. Плахтина Е.Г., Мазепа С.С., Куцик А.С. Частотно-керовані асинхронні та синхронні електроприводи. Львів: Вид. “Львівська політехніка”, 2002. 228 с.
110. Поздеев Д.А., Кудрявцев С.В. Интеллектуальная станция ALC800 компании АВВ для управления станками-качалками. Вестник НТУ ХПИ “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. 2008. № 30. С. 265–268.
111. Попович М.Г., Лозинський О.Ю., Клепиков В.Б. [та ін.] Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи: навч. пос. / За ред. М.Г. Поповича, О.Ю. Лозинського. К.: Либідь, 2005. 680 с.
112. Преобразователи частоты для асинхронных двигателей. Altivar 71. Каталог. Schneider Electric, 2006. 206 с.
113. Радимов С. Н., Букили Хишам. Математическая модель частотного привода, представленная в естественных трехфазных осях. Вестник ХГПУ “Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика”. 2000. Вып.113. С. 57–60.
114. Рзаев Аб. Г., Расулов С.Р., Абдурахманова А.М. Исследование диагностики состояния глубинного насоса. Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности. 2016. №10. С.8–10.
115. Ровінський В.А. Вдосконалення ватметрографічних методів діагностування штангових глибинно-насосних установок для видобутку нафти та розробка технічних засобів їх реалізації: автореф. дис....канд. техн. наук: 05.11.13. Ів.-Франківськ, 2003. 18 с.
116. Сагдатулин А.М. Разработка математической модели системы автоматизации электропривода штанговой скважинной насосной установки. Территория “НЕФТЕГАЗ”. 2014. № 4. С. 26–33.

117. Садов В.Б. Моделирование работы станка-качалки. Нефтяное хозяйство. 2019. № 1. С. 70–74.

118. Садов В.Б. Моделирование динамограмм с различными дефектами оборудования нефтяной скважины. Вестник ЮУрГУ. “Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника”. 2013. Т. 13, № 1. С. 16–25.

119. Садов В.Б. Определение дефектов оборудования нефтяной скважины по динамограмме. Вестник ЮУрГУ “Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника”. 2013. Том 13, №1. С.61–71.

120. Сакаев А.Ф. Системы и алгоритмы энергосберегающего управления частотно-регулируемыми электроприводами штанговых скважинных насосных установок: дис....канд. техн. наук: 05.09.03. Санкт-Петербург, 2009. 149 с.

121. Сегеда М.С. Математичне моделювання в електроенергетиці. Львів: Вид. Нац. ун-ту “Львівська політехніка”. 2002. 300 с

122. Сигова О.Б. Система оптимального управления электроприводом станка-качалки. Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т.12, №4(3) С. 614–617.

123. Смородов Е.А. Оперативный контроль сбалансированности станка-качалки на основе динамометрирования. Нефтяное хозяйство. 2001. № 7. С. 57–58.

124. Соколовский Г.Г. Электроприводы переменного тока с частотным регулированием: учебник для вузов. М.: Академия, 2006. 272 с.

125. Соломчак О.В., Маскевич У.М., Возняк О.С. Зниження споживання реактивної електроенергії електроприводами штангових глибинних насосів шляхом технологічної компенсації. Нафтогазова енергетика. 2007. № 1(2). С 11–16.

126. Станки–качалки 7СК12–2,5–4000 и 7СК8–3,5–4000. Каталог: Запасные части к нефтяному оборудованию. М.: Недра, 1973. 28 с.

127. Тагирова Л.Ф. Автоматизация управления технологическим процессом добычи нефти из малодебитных скважин на основе динамических моделей: автореф. дис.докт. техн. наук: 05.13.06. Уфа, 2008. 35 с.

128. Тагирова К.Ф., Вульфин А.М., Рамазанов А.Р., Фаткулов А.А. Повышение эффективности эксплуатации установки скважинного штангового насоса. Нефтяное хозяйство. 2017. № 7. С. 82–85.

129. Терехов В. А., Ефимов Д. В., Тюкин И. Ю. Нейросетевые системы управления. М.: Высшая школа, 2002. 184 с.

130. Уразаков К.Р., Бахтизин Р.Н., Исмагилов С.Р., Топольников А.С.. Расчет теоретической динамограммы с учетом осложнений в работе штангового насоса. Нефтяное хозяйство. 2014. №1. С. 90–93.

131. Уразаков К.Р., Мельников О.И., Андреев В.В., Абдулина М.Н. Выбор способа эксплуатации и расчета технологического режима работы скважин. Нефтяное хозяйство. 1994. №3. С. 42–46.

132. Файзулин И.К., Киселев В.В., Елдашев Д.А. Энергоресурсосберегающий режим эксплуатации малодебитных нефтяных скважин. Нефтяное хозяйство. 2007. № 1. С. 9–11.

133. Федотов А.В, Хомченко В.Г., Жильцов В.В. Моделирование привода погружного насоса интеллектуальной скважины: монография. Омск: Изд. ОмГТУ, 2012. 175 с.

134. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. К.: Наукова думка, 1979. 208 с.

135. Фираго Б.И., Павлячик Л.Б. Регулируемые электроприводы переменного тока. Минск: Техноперспектива, 2006. 363 с.

136. Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К. Машинные методы математических вычислений: пер. с англ. М.: Мир, 1980. 270 с.

137. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс, 2-е изд.: пер.с англ. М.: Издательский дом “Вильямс”, 2006. 1104 с.

138. Хакиянов М.И., Ковшов В.Д., Чикишев А.М., Максимов Н.С., Почуев А.И. Контролеры автоматизации установок штанговых глубинных насосов. Электронный журнал “Нефтегазовое дело”. 2007. №1. С. 46–56.

139. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Анализ динамограмм в контролерах систем автоматизации штанговых глубинно-насосных установок. Датчики и системы. 2011. №9. С. 38–40.

140. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Методика обработки динамограмм в информационно-измерительных системах управления штанговыми глубинными насосами. Вестник Уфимского госуд. авиационного технич. ун-та (УГАТУ). 2012. Т.16. №6(51). С. 32–36

141. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Мониторинг состояний штанговых глубиннонасосных установок по результатам анализа ваттметрограмм. Электронный журнал “Нефтегазовое дело. 2011. № 5. С. 26–36.

142. Хакимьянов М.И., Пачин М.Г. Функциональные возможности современного контроллера автоматизации штанговых глубиннонасосных установок. Электронный журнал “Нефтегазовое дело”, 2011. №2. С. 19–34.

143. Хакимьянов М.И., Светлакова С.В., Гузеев Б.В., Соловьев Я.Ю., Музалев И.В. Сравнительный анализ возможностей отечественных и импортных систем автоматизации скважин, эксплуатируемых ШГН. Электронный журнал “Нефтегазовое дело”. 2008.№2. С. 16–26.

144. Хакимьянов М. И. Современные станции управления скважинными штанговыми глубиннонасосными установками. Разработка нефтяных и газовых месторождений. 2014, т.12. № 1. С. 78–85.

145. Хакимьянов М.И. Удельный расход электроэнергии при механизированной добыче нефти штанговыми глубиннонасосными установками. Вестник УГАТУ. 2014. Т.18, №2(63). С. 54–60.

146. Чаронов В.Я., Егоров Е.Г., Генин В.С. Автоматизированный контроль работы станка-качалки нефти. Электротехника. 1998. № 1. С. 53–55.

147. Чаронов В.Я. Экономичные электроприводы для станков-качалок малodeбитных скважин. Нефтяное хозяйство, 1996. № 12. С. 46–48.

148. Чаронов В.Я., Шепелин А.В., Тварнов П.В. Особенности выбора структуры асинхронного частотно-регулируемого электропривода для механизмов добычи нефти. Нефтяное хозяйство. 1999. № 11. С. 28–31.

149. Чорний О.П., Луговой А.В., Родькін Д.Й., Сисюк Г.Ю, Садовий О.В. Моделювання електромеханічних систем. Кременчук: Крем. держ. політех. ун - т, 2001. 376 с.
150. Шагеев А.Ф., Тимушева А.М., Шагеева Л.Н., Гришкин А.С. Автоматизированный мониторинг процессов обработки скважин – первая ступень интеллектуальных систем управления. Нефтяное хозяйство. 2000. № 11. С.48–49.
151. Шаньгин Е.С., Тагирова К.Ф., Михеев П.С., Исбир Ф.А. Управление режимами работы установки скважинного штангового насоса на основе данных динамометрирования. М.: Новые технологии. 2005. №8. С. 46–49.
152. Шахназаров А.А. Оптимизация режима периодической эксплуатации батареи глубоких скважин. Нефтяное хозяйство. 1990. № 2. С. 37–39.
153. Ярыш Р.Ф., Гарифуллина А.Р., Гарифуллин Р.И., Якунин А.Н. Исследование режимов работы частотно-регулируемого электропривода станка-качалки. Изв. ВУЗ. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20. № 11–12. С. 56–64. doi:10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-56-64.
154. J.J. Hopfield. Neural Networks and Physical Systems with Emergent Collective Computational Abilities. National Academy of Sciences, USA 79, 1982, pp. 2554–2558.
155. J. Hertz, A. Krogh, and R.G. Palmer. Introduction to the Theory of Neural Computation. Addison–Wesley Longman Publishing Co. Inc. Boston, MA, USA, Reading, Mass., 1991.
156. J. Tian, M. Gao and G. Ge. Research on Intelligent Optimization Control Method for Oil Pumping. Advances in Mechanical Engineering, vol. 6, 2014.
157. J. Tian, M. Gao, S. Zhou and F. Zhang. Energy-Saving Control System of Beam-Pumping Unit Based on Wavelet Neural Network. 2008 Fourth International Conference on Natural Computation. Jinan, 2008, pp. 509–513.
158. J. Zhu, J.Q. Ruan, H.F. Sun. Comparative test study of energy-saving pumping and their effect. Oil Field Equipment. 2006. Vol.35. No.3. pp.60–62.

159. Kohonen T. Self-organization and associative memor. 1984. Series in Information Sciences, vol. 8. Berlin: Springer Verlag.
160. Liu Xinping, Xu Junpeng. The Method of Energy Saving in Beam Pumping Unit Based on Genetic Algorithm. AASRI Procedia, Vol.1, 2012, pp. 441–447.
161. Lv. H., Liu J., Han J., Jiang A. An Energy Saving System for a Beam Pumping Unit. Sensors. (Basel). 2016; V.16(5):685. P.p.1–13. DOI: <https://doi.org/10.3390/s16050685>
162. P. Lionel Evina Ekombu, Nouredine Ennahahi and Mohammed Oumsis, "Application of affine invariant Fourier descriptor to shape-based image retrieval", International Journal of Computer Science and Network Security (IJCSNS), 2009, vol.9, no.7, pp. 240 – 247.
163. Rogers G. Beraraghana D. An induction motor model with deep-bar effect and leakage inductance saturationю. Arhiv fur Electrotechnik. 1978. V. 60, № 4. pp. 193–201.
164. Romero O. J., Almeida P. Numerical simulation of the sucker-rod pumping system. Ingeniería e Investigación. 2014. vol. 34. no. 3. pp. 4–11.
165. S. Haykin. Neural Networks: A Comprehensive Foundation, 2nd Edition. Prentice Hall. 2000. 823p.
166. STM32 32-bit ARM Cortex MCUs. URL: <http://www.st.com/en/microcontrollers/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html?sc=stm32>.
167. Xiaohua Gu, Taifu Li, Zhiqiang Liao, Liping Yang, Ling Nie. Modeling and Optimization of Beam Pumping System Based on Intelligent Computing for Energy Saving. Journal of Applied Mathematics. 2014. Vol. 2014. p.p.1–7.
168. Yoh-Han Pao. Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks. Massachusetts. Western Reserve University, 1989.
169. Yunhua Yu, Haitao Shi, Lifei Mi. Research on Feature Extraction of Indicator Card Data for Sucker-Rod Pump Working Condition Diagnosis. Journal of Control Science and Engineering. 2013. 10.1155/2013/605749.



170. Zhang Deshi. Study of Power Balance Technology on Beam Pumping Unit. IEEE. 2nd International Conference “Measurement, Information and Control”,. 2013. vol.2. pp. 1324–1327.

171. Zi-Ming Feng, Jing-Jing Tan, Qi Li, Xin Fang. A review of beam pumping energy-saving technologies. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology. 2018. Vol. 8. Issue 1. p.p. 299–311.

172. Zong Ming, Geng Dayon, Wang Fengxiang. Wu Lijun. An intelligent controller for oil-pumping uni. Electrical Machines and Systems. – Proceedings of the Fifth International Conference ICEMS 2001. – Vol.2, № 2. – P.1254–1257.

173. A. Malyar, B. Kaluzhnyi, A. Andreishyn, K. Molnar. Effect of sucker-rod pumping unit walking beam oscillation frequency on asynchronous electric drive. Computation Problem of Electrical Engineering. Vol.6, No.1. 2016. P.p. 25–30.

174. A. Malyar, A. Andreishyn, B. Kaluzhnyi, I. Holovach. Study of the Hamming Network Efficiency for the Sucker-Rod Oil Pumping Unit Status Identificatio. Computation Problem of Electrical Engineering. No.1. 2017. P.p. 43–49.

175. FreeRTOS Documentation. Электронный ресурс, URL: [https://www.freertos.org/Documentation/RTOS\\_book.html](https://www.freertos.org/Documentation/RTOS_book.html)

## ДОДАТОК 1

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор з наукової роботи  
НУ "Львівська політехніка"

Н.І. Чухрай

«20» \_\_\_\_\_ 2015 р.  


ЗАТВЕРДЖУЮ

Головний інженер НГВУ

«Долина нафтогаз»

І.Я. Яремко

«20» \_\_\_\_\_ 2015 р.  


АКТ

експериментальних досліджень макетного взірця  
автоматичної системи керування нафтовидобувною установкою на основі нейронної мережі

Ми, що нижче підписалися, представники НУ "Львівська політехніка" з однієї сторони та представники НГВУ "Долина нафтогаз" з другої сторони, підтверджуємо, що у період з серпня 2014 р. по січень 2015 р. співробітниками кафедри електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем Національного університету "Львівська політехніка" і працівниками НГВУ "Долина нафтогаз" були проведені експериментальні дослідження на глибинопомпових свердловинах № 9Спас і № 252 НГВУ "Долина нафтогаз" макетного взірця автоматичної системи керування нафтовидобувною установкою на основі нейронної мережі.

Принцип керування запропонованої системи базується на основі розпізнавання образів динамограм та струмограм з допомогою нейронної мережі. Ця система дозволяє розпізнавати стан свердловини, рівень заповнення пласта та встановлювати оптимальний режим відбору рідини зі свердловини.

Для її реалізації використано алгоритми та моделі, які запропоновані в дисертаційній роботі Андрєшина А.С. Макет системи виготовлений окремим блоком, який складається з програмно-апаратного комплексу на основі комплекту відладки з платою OPEN107V з мікроконтролером STM32F107, частотного перетворювача фірми Schneider Electric ATV32N018M2. Для отримання вхідної інформації в системі використано комплект датчиків, до яких входить датчик струму, датчик зусилля та кінцеві датчики.

Результати цих досліджень підтвердили працездатність системи керування роботою електроприводу глибинопомпової установки. Проведено тестування розробленого програмно-апаратного комплексу можливість працювати в реальному часі та правильно розпізнавати стан свердловини при різних вхідних даних, які дозволяють зробити висновок про їх ефективність.

Проведені експериментальні дослідження макетного взірця системи підтверджують можливість його використання на періодичних малодебітних свердловинах, що призведе до збільшення їх продуктивності, продовження міжремонтного періоду роботи глибинопомпової установки на 16% і зменшення витрат електроенергії на одиницю видобутої рідини на 12%.

Від НУ "Львівська політехніка"

аспірант А.С. Андрєшинк.т.н., доц. Б.С. Калужнийк.т.н., доц. І.Р. Головач

Від НГВУ "Долина нафтогаз"

Начальник технічного відділу

В.А. Ровенчак

Головний метролог

П.С. Лесюк

## ДОДАТОК 2



ЗАТВЕРДЖУЮ

проєктор науково-педагогічної роботи

Національного університету

"Львівська політехніка"

доц. Давидчак О.Р.

\_\_\_\_\_ 2015 р.

## АКТ

про впровадження в навчальний процес результатів кандидатської дисертації Андрєйшина А.С.  
"Система автоматичного керування нафтовидобувною установкою на основі нейронної мережі"

Комісія в складі голови науково-методичної ради Інституту енергетики та систем керування, докт. техн. наук, професора Маляра В.С., голови методичної комісії кафедри електроприводу і комп'ютеризованих електромеханічних систем, докт. техн. наук, проф. Паранчука Я.С. та канд. техн. наук, доцента Калужного Б.С. склала даний акт про те, що результати дисертаційної роботи Андрєйшина А.С., а саме:

- комп'ютерні моделі штангової глибинопомпової установки;
- синтез різних типів нейронних мережі для реалізації схем розпізнавання образів;
- система оперативного контролю, діагностики та оптимізації роботи штангових глибинопомпових установок;
- математична модель оптимізації роботи штангових глибинопомпових установок з врахуванням дебіту пласта;
- алгоритми реалізації систем керування в реальному часі на базі мікроконтролерів фірм ATMEGA і STM;

включені в програми навчальних дисциплін "Електрообладнання і автоматизація процесів видобутку нафти", "Моделювання електроприводів" і використовуються у лекціях, лабораторному практикумі, курсовому та дипломному проектуванні під час підготовки бакалаврів напрямку 6.050702 "Електромеханіка" та спеціалістів і магістрів спеціальності 7(8).05070204 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривід".

Голова НМР ІЕСК

д.т.н., професор

д.т.н., професор

к.т.н., доцент

Маляр В.С.

Паранчук Я.С.

Калужний Б.С.